

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE PAVIMENTOS DE MADEIRA ANTIGOS

RICARDO ALBERTO SALAZAR GONÇALVES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor João Paulo Miranda Guedes

Coorientador: Engenheiros Bruno Quelhas Silva e Tiago Ilharco

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

Se o conhecimento pode criar problemas, não será através da ignorância que os resolveremos.

Isaac Asimov

AGRADECIMENTOS

Queria agradecer à minha família pelo apoio incondicional, e em especial aos meus pais, por me terem proporcionado todos os meios necessários para chegar a esta etapa de minha vida.

Também quero agradecer ao professor, Joao Paulo Miranda Guedes, que esteve sempre disponível para me ajudar na realização desta dissertação, agradeço também ao Eng. Bruno Quelhas e Tiago Ilharco, por todo suporte que me deram na realização dos ensaios dinâmicos, e a todos os elementos do NCREP que sempre se disponibilizaram a ajudar-me.

E agradeço a todos os meus amigos, que me ajudaram a passar por diversas etapas ao longo do curso.

RESUMO

A reabilitação em Portugal tem vindo a ganhar destaque em relação à construção nova, sendo por isso cada vez mais importante o conhecimento dos sistemas construtivos antigos. Assim sendo, conhecer bem as propriedades físicas e mecânicas dos elementos é sempre uma mais valia quando se pretende realizar um diagnóstico, ou implementar uma medida de intervenção, eficiente e económica.

Um dos elementos construtivos que se destacam são os pavimentos em madeira que, para além de serem muito comuns em edifícios antigos, também são um elemento estrutural fundamental, pois conferem plataformas para a utilização do espaço e estabelecem ligações entre os elementos estruturais verticais, conferindo às edificações um comportamento do tipo caixa.

Com o intuito de se conseguir compreender as características mecânicas dos pavimentos de madeira antigos, foram elaborados vários ensaios não destrutivos, com recurso a um sismógrafo, e com os resultados das frequências de vibração obtidas, foram calibrados modelos numéricos para simulação destes pavimentos de forma a estimar algumas das suas características mecânicas.

Foram também estudados pavimentos em diferentes estados de conservação, nos quais foram realizados estudos paramétricos, com o objetivo de compreender a influência dos vários elementos, nomeadamente do soalho, do teto, do vigamento e do tarugamento na sua rigidez global.

Nesta dissertação, para além dos ensaios dinâmicos efetuados, também foram adicionados alguns ensaios dinâmicos de pavimentos já realizados pelo gabinete NCREP, Lda, com o intuito de criar uma base de dados com o maior número possível de ensaios dinâmicos para melhor sustentar algumas eventuais correlações entre as frequências obtidas nos ensaios e algumas propriedades dos elementos dos pavimentos.

PALAVRAS-CHAVE: madeira, pavimentos, reabilitação, ensaios dinâmicos, caracterização mecânica.

ABSTRACT

Rehabilitation in Portugal has gained prominence over new constructions, making important the knowledge about old buildings systems. Therefore, know well the physical and mechanical properties of the elements is always a plus when you want to make a diagnosis, or implement an intervention measure, efficient and economic.

One of the building elements that stand out are timber floors that, besides being very common in old buildings, are also a key structural element as they provide platforms for space utilization and establish links between the vertical structural elements, providing a box-type behaviors.

In order to be able to understand the mechanical characteristics of old timber floors, it were performed non-destructive tests, using a seismograph, and the obtained vibration frequencies were used to calibrate numerical models to simulate these type of floors, allowing estimating some of their mechanical characteristics.

It were also analysed floors in different states of conservation, in which it were conducted parametric studies to understand the influence of various elements, including the floorboards, the ceiling and the beams in its overall rigidity.

In this thesis, and in addition to the performed dynamic tests, it were also added the results of dynamic tests already carried out by the design office NCREP Ltd, in order to create a database with the largest possible number of results to better sustain eventual correlations between vibrations frequencies obtained experimentally and some properties of the timber floors elements.

Keywords: Timber, flooring, rehabilitation, dynamic tests , mechanical characterization

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	1
2. A IMPORTÂNCIA DA REABILITAÇÃO	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. O QUE É REABILITAR?	3
2.3. A SUA IMPORTÂNCIA	4
2.4. METODOLOGIA APLICADAS	4
3. A MADEIRA NA CONSTRUÇÃO	7
3.1. INTRODUÇÃO	7
3.2. ANATOMIA DA MADEIRA	7
3.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA	9
3.3.1. TEOR DE ÁGUA	9
3.3.2. RETRAÇÃO	10
3.3.3. MASSA VOLUMICA	11
3.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS	11
3.4.1. RESISTENCIA A COMPRESSÃO	12
3.4.2 RESISTENCIA A TRAÇÃO	12
3.4.3. RESISTÊNCIA A FLEXÃO	13
3.4.4. RESISTÊNCIA AO CORTE	13
3.4.5. CLASSES RESISTENTES DA MADEIRA	14
3.4.6. MADEIRAS UTILIZADAS NA CONSTRUÇÃO.	16
4. CARACTERIZAÇÃO DE PAVIMENTOS DE MADEIRA ANTIGOS	19
4.1. INTRODUÇÃO	19
4.2. VIGAMENTOS	20
4.3. APOIOS	20
4.4. SOALHO	22
4.5. TARUGOS	22
5. PATOLOGIAS EM PAVIMENTOS DE MADEIRA	25
5.1. INTRODUÇÃO	25

5.2. PATOLOGIAS DE ORIGEM ANATÓMICA	25
5.2.1. FUSTE	25
5.2.2. Nós	25
5.2.3. INCLINAÇÃO DO FIO	25
5.2.4. BOLSAS DE RESINA E SEIVA.....	26
5.3. PATOLOGIAS DE ORIGEM ABIÓTICA	27
5.3.1. AGENTES ATMOSFÉRICOS.....	27
5.3.2. FOGO	27
5.3.3. QUÍMICOS	27
5.4. PATOLOGIAS DE ORIGEM BIÓTICA.....	28
5.4.1. FUNGOS XILÓFAGOS.....	28
5.4.2. INSETOS XILÓFAGOS.....	28
5.5. PATOLOGIAS DE ORIGEM ESTRUTURAL.....	29
6. INSPEÇÃO E DIAGNOSTICO	31
6.1. INTRODUÇÃO	31
6.2. INSPEÇÃO COM RECURSO A ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	31
6.3.1. MARTELO E FORMÃO	31
6.3.2. HIGRÔMETRO.....	31
6.3.3. VIDEOSCÓPIO	32
6.3.4. RESISTÓGRAFO.....	32
6.3.5. PILODYN	34
6.3.6. TÉCNICAS TERMOGRÁFICAS	34
6.3.7. SISMÓGRAFO	35
7. CASOS DE ESTUDO	37
7.1. INTRODUÇÃO	37
7.2. RUA DE CEDOFEITA.....	37
7.2.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL.....	37
7.2.2. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	38
7.2.3. MEDIÇÕES	39
7.3. PRAÇA CORONEL PACHECO	41
7.3.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL.....	41
7.3.2. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	41
7.3.3. MEDIÇÕES	42
7.4. RUA DO ALMADA E RUA ALFARES MALHEIRO	44
7.4.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL.....	44
7.4.2. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL.....	44
7.4.3. MEDIÇÕES	45

7.5. RUA DO ROSÁRIO	47
7.5.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL	47
7.5.2. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL	47
7.5.3. MEDIÇÕES	48
8.MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES COM RECURSO AO SISMÓGRAFO	51
8.1. PROCESSAMENTO DE SINAL	51
8.2. MEDIÇÕES DAS FREQUÊNCIAS DOS PAVIMENTOS DOS CASOS DE ESTUDO	52
8.3. RESULTADOS DAS FREQUÊNCIAS DOS PAVIMENTOS DOS CASOS DE ESTUDOS	53
8.8.1. RUA DE CEDOFEITA	53
8.8.2. RUAS DO ALMADA E ALFERES MALHEIRO	54
8.8.3. PRAÇA CORONEL PACHECO	54
8.8.4. RUA DO ROSÁRIO	55
9. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PAVIMENTOS	57
9.1. INTRODUÇÃO	57
9.2. VALORES TEÓRICOS	57
9.3. MODELO NUMÉRICO DOS PAVIMENTOS DO EDIFÍCIO DA RUA DO ALMADA	58
9.4. MODELO NUMÉRICO DOS PAVIMENTOS DO EDIFÍCIO DA PRAÇA CORONEL PACHECO	62
9.5. MODELO NUMÉRICO DOS PAVIMENTOS DO EDIFÍCIO DA RUA DO ROSÁRIO	65
9.6. MODELO NUMÉRICO DOS PAVIMENTOS DO EDIFÍCIO DA RUA DE CEDOFEITA	67
9.7. ANÁLISE DE RESULTADOS DO COMPORTAMENTO DINÂMICO	70
9.7.1. ESTUDOS PARAMÉTRICOS	71
9.7.1.1.Considerações gerais	75
10. ESTUDOS GERAIS	79
11. CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
11.1.CONCLUSÃO	85
11.2.SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS.	86
Anexos	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.4.1 - Esquema da metodologia utilizada na reabilitação	5
Figura 3.2.1 - Direções principais e planos principais em um tronco de madeira	8
Figura 3.2.2 - Elementos anatómicos (tronco de madeira)	8
Figura 3.3.1 - Percentagem da retração em conformidade com as 3 direções principais.....	10
Figura 3.4.1 - Resistência do pinho bravo e solicitações mecânicas em várias direções. [1]	12
Figura 3.4.2 - (a) Compressão paralela as fibras; (b) Compressão perpendicular as fibras [4]	12
Figura 3.4.3 - (a) Tração paralela as fibras; (b) Tração perpendicular as fibras [4]	13
Figura 3.4.4 - (a) Diagrama de força /deformação em ensaio de flexão estática. [1]; (b) Flexão na madeira. [4].....	13
Figura 3.4.5 - (a) Corte perpendicular as fibras; (b) corte paralelo ao plano das fibras; (c) corte transversal em relação ao eixo longitudinal. [4]	14
Figura 4.1.1 - Vista inferior de um pavimento de madeira do fim do Séc. XIX	19
Figura 4.3.1 - Ferrolho de esquadro [6]	21
Figura 4.3.2 - Ferrolho com ligação ao exterior da parede [6]	21
Figura 4.3.3 - vigas apoiadas num frechal [6]	21
Figura 4.3.4 - Cachorro embebido na parede a dar apoio ao frechal. [6]	22
Figura 4.5.1 - Tarugamento simples em vigamentos de secção retangular: edifício do Largo de São Domingos, Porto [6].....	22
Figura 4.5.2 - Execução de tarugos em cruzeta [6]	23
Figura 4.5.3 - Tarugos entolanados	23
Figura 5.2.1 - Resistência a compressão em relação a inclinação do fio da madeira [1].....	26
Figura 5.2.2 - (a) Bolsa de resina; (b) nó podre e nó firme; (c) fuste espiralado [1]	26
Figura 6.2.1 - Avaliação do teor de humidade de uma viga de madeira com recurso a higrómetro [6]	32
Figura 6.2.2 - Resistógrafo	33
Figura 6.2.3 - Resultados obtidos a partir de um ensaio de um resistógrafo	33
Figura 6.2.4 - Exemplo de um Pilodyn	34
Figura 6.2.5 - (a) Imagem termográfica de 2 peças de madeira com diferencial de humidade; (b) imagem termográfica de térmitas numa viga de madeira	35
Figura 6.2.6 - Sismógrafo 18-bits	36
Figura 7.2.1 - Fachada do edifício da rua de Cedofeita.....	38

Figura 7.2.2 - Apoios do vigamento do edifício de Cedofeita.....	39
Figura 7.2.3 - Vigamento pavimentos de Cedofeta.....	39
Figura 7.2.4 - Planta do piso 2, com identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	39
Figura 7.2.5 - Planta do piso 1, com identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	40
Figura 7.3.1 - Fachada do edifício da praça Coronel Pacheco	41
Figura 7.3.2 - Pavimento PVCP_1	42
Figura 7.3.3 - Planta do piso 3, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	42
Figura 7.3.4 - Planta do piso 2, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	42
Figura 7.3.5 - Planta do piso 1, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos	43
Figura 7.3.6 - Planta do piso 0, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	43
Figura 7.4.1 - Fachada do edifício da rua do Almada	44
Figura 7.4.2 - (a) - Pavimento PVRA_3; (b) - Pavimento PVRA_6	45
Figura 7.4.3 - Planta do piso 4, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	45
Figura 7.4.3 - Planta do piso 3, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	46
Figura 7.4.4 - Planta do piso 2, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	46
Figura 7.4.5 - Planta do piso 1, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	46
Figura 7.5.1 - Fachada posterior do edifício da rua do Rosário.....	47
Figura 7.5.2 - Planta do piso 4, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	49
Figura 7.5.3 - Planta do piso 3, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	49
Figura 7.5.4 - Planta do piso 2, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	49
Figura 7.5.5 - Planta do piso 1, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos.....	49
Figura 8.2.1 - Metodologia aplicada nas medições dos pavimentos	53
Figura 9.2.1 – Primeiros 3 modos de vibração fundamentais de uma viga na direcção y.....	58
Figura 9.3.1- Características do modelo de casca para o soalho	59

Figura 9.3.2 - Planta estrutural do pavimento PVRA_5	61
Figura 9.3.3 - simulação numérica do pavimento PVRA_5	61
Figura 9.3.4 - Planta estrutural do pavimento PVRA_4	62
Figura 9.3.5 - simulação numérica do pavimento PVRA_4	62
Figura 9.4.1 - Planta estrutura do pavimento PVRC_1	64
Figura 9.4.2 - Simulação numérica do pavimento PVCP_1	64
Figura 9.4.3 - Planta estrutura do pavimento PVRC_2	65
Figura 9.4.4 - simulação numérica do pavimento PVCP_2	65
Figura 9.5.1 - Planta estrutural do pavimento PVRR_1	66
Figura 9.5.2 - simulação numérica do pavimento PVRR_1	66
Figura 9.5.3 - Planta estrutural do pavimento PVRR_8	67
Figura 9.5.4 - simulação numérica do pavimento PVRR_8	67
Figura 9.6.1 - planta estrutural do pavimento PVC_1	68
Figura 9.6.2 - Modelo numérico do pavimento PVC_1	69
Figura 9.6.3 - planta estrutural do pavimento PVC_3	69
Figura 9.6.4 - Modelo numérico do pavimento PVC_3	69
Figura 9.7.1 - Frequências vs. nº de vigas.....	74
Figura 9.7.2 - Modelo numérico para o estudo da influência das classes resistentes da madeira	75
Figura 9.7.3 - Modelo numérico do pavimento PVRR_1.....	76
Figura 9.7.4 - Diagrama de momentos fletores da viga VM3 do pavimento PVRR_1.....	77
Figura 10.1 - Correlação entre a frequência de vibração do primeiro modo e o vão	82
Figura 10.2 - Correlação entre frequência e a inercias das vigas.....	83
Figura 10.3 - Correlação entre a inércia e o espaçamento entre vigas.....	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.4.1 - Tabela das classes resistentes da madeira segundo a EN338.....	15
Tabela 3.4.2 - Classes de resistência da madeira lamelada-colada homogênea	16
Tabela 3.4.3 - Classes de resistência da madeira lamelada-colada combinada.....	16
Tabela 7.2.1 - Medições dos vigamentos do edifício da rua de Cedofeita	40
Tabela 7.2.2 - Medições dos tarugos do edifício da rua de Cedofeita.....	40
Tabela 7.3.1 - Medições dos vigamentos do edifício da praça Coronel Pacheco	43
Tabela 7.3.2 - Medições dos tarugos do edifício da praça Coronel Pacheco	44
Tabela 7.4.1 - Medições dos vigamentos do edifício da Rua do Almada e Alferes Malheiro.....	46
Tabela 7.5.1 - Medição dos vigamentos do edifício da rua do Rosário	49
Tabela 7.5.2 - Tipo de apoios e medições de tarugos da rua do Rosário	50
Tabela 8.3.1 - Resultados das frequências dos pavimentos da rua de Cedofeita	53
Tabela 8.3.2 - Resultados das frequências dos pavimentos das ruas do Almada e Alferes Malheiro ..	54
Tabela 8.3.3 - Resultados das frequências dos pavimentos da praça Coronel Pacheco	54
Tabela 8.3.4 - Resultados das frequências dos pavimentos da rua do Rosário	55
Tabela 9.3.1 - Propriedades mecânicas e geométricas dos pavimentos do edifício da rua do Almada	58
Tabela 9.3.2 - Comparação entre as frequência de vibração e a aplicação do offset (40% de encastramento das vigas na parede).....	60
Tabela 9.3.3 - Comparação entre as frequências de vibração e o respectivo grau de encastramento nos apoios	60
Tabela 9.3.4 - Frequências de vibração dos modelos numéricos dos pavimentos da rua do Almada ..	62
Tabela 9.4.1 - Valores das propriedades mecânicas e geométricas dos pavimentos da praça Coronel Pacheco.....	63
Tabela 9.4.2 - Comparação entre as frequências de vibração e o respectivo graus de encastramento da ligação vigas/tarugos.....	63
Tabela 9.4.3 - Frequências de vibração dos modelos numéricos dos pavimentos do edifício da praça Coronel Pacheco	65
Tabela 9.5.1 - Propriedades mecânicas e geométricas dos pavimentos do edifício da rua do Rosário	66

Tabela 9.5.2 - Frequências de vibração dos modelos numéricos dos pavimentos do edifício da rua do Rosário.....	67
Tabela 9.6.1 - Propriedades mecânicas e geométricas dos pavimentos do edifício da rua de Cedofeita	68
Tabela 9.6.2 - Frequências de vibração dos modelos numéricos dos pavimentos do edifício da rua de Cedofeita	70
Tabela 9.7.1 - Erro entre os modelos numérico e os ensaios dinâmicos	70
Tabela 9.7.2 - Frequências de vibração do pavimento PVRC_1 para diferentes alturas das vigas.....	72
Tabela 9.7.3 - Frequências de vibração do pavimento PVRA_4 para as 2 situações de massas adicionais	72
Tabela 9.7.4 - Frequências de vibração do pavimento PVRA_5 para diferentes larguras, ou seja número de vigas	73
Tabela 9.7.5 - Frequências de vibração do pavimento PVCP_1 para diferentes alinhamentos de tarugos	74
Tabela 9.7.6 - Frequências de vibração do pavimento PVCP_1 para diferentes espaçamentos entre vigas.....	75
Tabela 9.7.7 - Frequência do primeiro modo de vibração para as várias classes resistentes da madeira	75
Tabela 9.7.8 - Comparação entre grau de encastramento nos apoios e momentos fletores na vigas VM3 do pavimento PVRR_1.....	77

1.

INTRODUÇÃO

1.1. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

A madeira, foi um dos primeiros materiais de construção utilizados pelo homem. Desde muito cedo se descobriram a suas propriedades mecânicas e físicas, que proporcionam estruturas estáveis e duradouras.

Na cidade do Porto, Portugal, a madeira é o material mais utilizado nos pavimentos das edificações antigas, consideradas anteriores ao uso massivo do betão armado, e que, com o aumento das ações de reabilitação, se têm tornado alvo de estudo de forma a promover uma melhor caracterização do seu comportamento mecânico.

Esta dissertação, intitulada “Avaliação das características de pavimentos de madeira antigos”, vem cimentar alguns estudos realizados anteriormente. Em particular, pretende-se construir modelos numéricos ajustados ao comportamento real dos pavimentos de madeira antigos através de procedimentos de identificação dinâmica, permitindo a calibração/caracterização de algumas das características mecânicas dos seus componentes, nomeadamente dos tarugos, soalho, vigamento e tetos de gesso, e analisada a influência que estes componentes têm no comportamento mecânico do pavimento.

Para a elaboração dos ensaios dinâmicos foram fornecidos pelo NCREP, Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda, alguns casos de estudos, que foram ensaiados com o apoio de alguns técnicos da empresa, e com o recurso aos sismógrafos fornecidos pelo Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da FEUP.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para além do capítulo introdutório esta dissertação está dividida em duas partes principais; a primeira, do capítulo 2 ao 6, corresponde à introdução de conceitos fundamentais para os estudos que se seguem desde o capítulo 7 ao 11.

Assim, no capítulo 2 serão abordados alguns aspectos sobre obra a reabilitação, a sua importância e o seu método de execução.

No capítulo 3 é descrita a caracterização anatômica da madeira, as suas propriedades físicas e mecânicas, bem como algumas espécies de árvores utilizadas na construção.

No capítulo 4 são introduzidos os elementos construtivos dos pavimentos de madeira.

No capítulo 5 são referidos alguns danos comuns nos pavimentos de madeira antigos, e as consequências que este podem ter nos pavimentos.

O capítulo 6 é dedicado aos métodos de inspeção que podem ser realizados em pavimentos de madeira antigos para se conseguir caracterizar as propriedades físicas e mecânicas da madeira, bem como algumas patologias.

No capítulo 7 são abordados os 4 casos de estudos que foram analisados com mais detalhe e é feita uma caracterização geral, bem como são caracterizados os pavimentos de madeira destes edifícios.

No capítulo 8 é explicada a metodologia aplicada na elaboração dos ensaios dinâmicos, bem como são apresentados os resultados das frequências de vibração dos pavimentos de madeira dos 4 casos de estudo.

No capítulo 9 apresentam-se os modelos numéricos de alguns pavimentos selecionados dos 4 casos de estudo, são explicadas as considerações feitas para a criação dos modelos e são efetuados alguns estudos paramétricos dos pavimentos.

O capítulo 10 é dedicado aos estudos gerais, isto é, agrupa todos os ensaios dinâmicos realizados na presente dissertação a outros ensaios já realizados pelo NCREP de forma a analisar possíveis correlações entre os dados.

No capítulo 11 é feita a conclusão e ideias de futuros trabalhos a realizar no âmbito desta dissertação.

2.

A IMPORTÂNCIA DA REABILITAÇÃO

2.1. INTRODUÇÃO

Sendo esta dissertação sobre a caracterização mecânica de pavimentos de madeira antigos, é importante saber o que é a reabilitação, visto que a maior parte dos casos de estudo analisados foram em pavimentos de edifícios reabilitados ou em vias de serem reabilitados.

A reabilitação é um mecanismo de preservação do nosso património que requer a organização de estudos complexos que sigam uma ordem semelhante à da medicina: anamnese, diagnóstico, terapia e controlo, que correspondem à apreciação de informação histórica, à identificação de causas de danos e degradações e à seleção de ações de tratamento.

Neste capítulo irá ser introduzido o conceito de reabilitação para nos dar a entender o que é, a importância que tem numa sociedade e a dinamização económica que promove. Será ainda referida, de uma forma generalizada, qual a metodologia a aplicar na reabilitação de edifícios.

2.2. O QUE É REABILITAR?

Segundo o International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (ICOMOS, 2003) o conceito de reabilitação é: *“(...) qualquer ação que assegure a sobrevivência e a preservação para o futuro de: edifícios, bens culturais, recursos naturais, energia ou outra fonte de conhecimento com valor. Enquadra-se em vertentes de intervenção para uso futuro do edifício, pelo que a avaliação da função adequada/compatível com a estrutura e a tipologia do edifício é uma das premissas deste processo. Por este facto não se pode considerar Reabilitação os casos de demolição total do interior do edifício e simples manutenção das fachadas.”* [16].

Por isso, reabilitar é perceber como um edifício está enquadrado, no ambiente urbano e como a estrutura se comporta no meio envolvente, permitindo que o edifício a reabilitar tenha as mesmas características estruturais que tinha quando foi construído, mas adaptadas às novas exigências, i.e. deve habilitar o edifício de condições que lhe permitam cumprir normas fundamentais de segurança e funcionalidade.

A reabilitação é um mecanismo fundamental para a preservação da história de um país, de uma cultura e de um povo, que nos permite beneficiar não só da beleza arquitetónica de um edifício, seja ele uma igreja, uma casa brasonada, ou um edifício residencial comum, como também nos permite beneficiar do fator atração turística e de todo o dinamismo e poder económico que traz para zona reabilitada.

2.3. A SUA IMPORTÂNCIA

- Preservação de valores culturais

Preservar a identidade de uma zona histórica e a sua relação com os habitantes locais é, infelizmente, algo relativamente novo que não evitou a degradação completa de alguns edifícios. Até há algum tempo atrás apenas se dava importância aos monumentos históricos, desvalorizando-se as construções correntes. Atualmente, dá-se valor a todo o conjunto arquitetónico, salientando a importância da identidade de uma região e permitindo observar a evolução que os edifícios sofreram e como se tiveram que adaptar às novas funções de uso, representando um testemunho “vivo” entre o homem e o edifício [10].

- Proteção ambiental

Como a reabilitação e o reaproveitamento estão de mãos dadas, reabilitação significa um menor desperdício de materiais. Implicando maior utilização de materiais menos agressivos para o ambiente, característicos da época de construção dos edifícios, como a madeira, areia, pedra e cal, em vez dos polímeros e aços. Estes dois últimos materiais não são naturais e têm uma difícil desintegração na natureza, também são fontes de poluição processada no seu fabrico, como a libertação de CO₂ para a atmosfera [10].

- Vantagens económicas

A reabilitação tira proveito dos materiais já existentes nos edifícios, o que resulta mais económico do que substituir elementos estruturais originais por novos. Atualmente algumas câmaras municipais com o intuito de promover a reabilitação, também criaram alguns mecanismos que facilitam os procedimentos do licenciamento de obras de reabilitação.

De uma forma menos direta, mas não menos importante, também é importante realçar o aproveitamento do aumento de turistas que um local reabilitado pode oferecer, que por sua vez traz maiores rendimentos económicos para a região.

2.4. METODOLOGIA APLICADAS

Para uma reabilitação bem-sucedida dever-se-á seguir um procedimento de execução que assente nos seguintes processos:

- Inspeção,
- Diagnóstico,
- Proposta de Intervenção
- Monitorização.

Assim, temos uma primeira fase da inspeção que consiste no levantamento histórico do edifício, numa inspeção do estado geral em que se encontra, recorrendo, ou não a ensaios e(ou) sondagens não destrutivos, ou medianamente destrutivos que nos levam a uma pormenorização do estado real do edifício, e que permitem chegar a diagnósticos mais conclusivos e à seleção de medidas de intervenção mais acertadas. Depois de concluída a obra de reabilitação o edifício deverá ser sujeito a medidas de manutenção, que prolonguem o seu estado de conservação. Na figura 2.3.1 estão esquematicamente representados os principais passos que se têm que tomar numa reabilitação.



Figura 2.4.1 - Esquema da metodologia utilizada na reabilitação

3.

A MADEIRA NA CONSTRUÇÃO

3.1. INTRODUÇÃO

A madeira, devido ao seu fácil manuseamento, foi dos primeiros materiais a ser utilizado nas construções feitas pelo Homem, caindo um pouco em desuso a partir de revolução industrial com o aparecimento do aço e, posteriormente, do betão e a sua produção em grande escala [17].

Embora o betão e o aço sejam muito utilizados nos elementos estruturais das edificações, a madeira pode estar em pé de igualdade com estes materiais, isto porque é um material com grande durabilidade, havendo registos de estruturas milenares (Templo de Kiyomizudera em Kyoto), ao contrário do ferro não oxida e que quando sujeita ao fogo, é formado ao redor da peça de madeira uma capa carbonizada, que protege a madeira de arder por completo, não apresentando as deformações excessivas do aço que acaba por perder a suas funções estruturais.

No que diz respeito aos requisitos de mão-de-obra, a madeira é mais económica, necessitando de menos operários na sua colocação do que uma estrutura em betão armado. Por outro lado, como a madeira é um material natural, tem que ser sempre usada de forma sustentável, dando tempo para que haja a repovoação de novas arborizações.

Neste capítulo ira ser abordada a anatomia da madeira, as suas propriedades físicas e mecânicas, e as classificações das propriedades mecânicas para peças de madeira maciças e lameladas-coladas. Sendo o principal objetivo, perceber como a madeira se comporta na construção, e usar esse conhecimento para se construir de forma mais eficiente.

No fim do capítulo vão ser referidas alguns tipos de madeira mais frequentemente utilizada nas construções do nosso país .

3.2. ANATOMIA DA MADEIRA

A madeira é formada por um tecido denominado de lenho que vai dar propriedades únicas a cada peça de madeira, devido a sua disposição morfológica, como à frente se irá descrever.

Para melhor se perceberem as propriedades físicas e mecânicas da madeira, a suas características anatómicas são estudadas em três planos principais com mostra a (figura 3.21.) [1].

- a) Plano Radial
- b) Plano transversal
- c) Plano tangencial

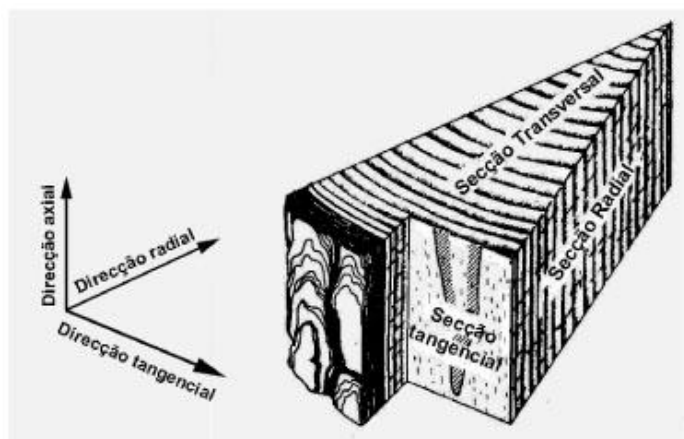


Figura 3.2.1 - Direções principais e planos principais em um tronco de madeira

A madeira, como é um ser vivo tem vários componentes que a definem e que proporcionam uma boa ou má resistência para aplicação na construção. Para se ter uma melhor noção deste material, vão ser referenciadas algumas das suas características anatómicas. Na (Figura 3.2.2) estão representados alguns dos elementos anatómicos de uma árvore.

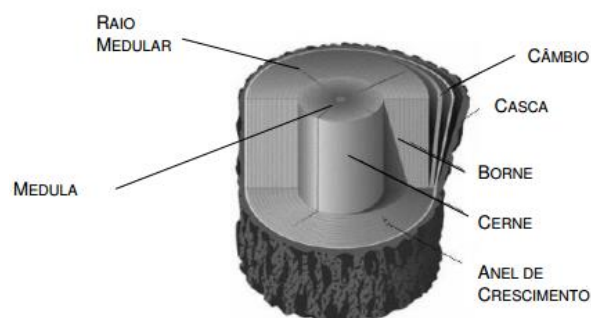


Figura 3.2.2 - Elementos anatómicos (tronco de madeira)

a) Anéis de crescimento

Na secção transversal podemos identificar facilmente formações circunferenciais, denominadas anéis de crescimento (anéis anuais), que nos dão uma aproximação da idade da árvore; quanto mais antiga, maior é a quantidade de anéis que apresenta, embora em alguns casos, devido a períodos de seca, frios tardios, desfoliações por insetos ou queda de granizo, possam formar-se falsos anéis que nos reverterem para uma idade falsa da árvore. [17]

b) Borne

O borne é observado no plano transversal da árvore. É formado pelas camadas exteriores da árvore que contêm uma grande percentagem de células vivas, e apresenta uma cor mais clara. Para além de função resistente, também tem função de conduzir a seiva bruta por capilaridade desde as raízes da árvore até a copa. Esta parte da árvore costuma ser utilizada para fins estruturais devido a sua boa resistência mecânica e leveza. [17]

c) Cerne

O cerne encontra-se no centro do plano transversal e é formado pelas células mortas do borne, distinguindo-se por ter uma cor mais escura do que borne. Apresenta uma maior densidade, compacidade, resistência mecânica e durabilidade. Também é mais resistente aos predadores da madeira devido a impregnações de resinas e óleos que se vão acumulando nesta parte da madeira, e que são tóxicos ou repelentes naturais para os insetos.

Devido a estas propriedades, o cerne poderia ser a melhor parte para a ser utilizada na construção, mas devido a proporção com que o borne se encontra no tronco de madeira, de 25% a 50% é antieconómico extrair todo o borne para uma exclusiva utilização do cerne. Em contrapartida, o borne apresenta uma melhor impregnação a alguns produtos anti-deteriorantes, (vernizes, tintas, etc.) que se possam vir a aplicar [17].

d) Casca

A casca serve para proteção do lenho e para transporte da seiva da raiz até as folhas da árvore. Não tem grande interesse para a construção, exceto nos sobreiros onde a casca tem camadas muito espessas (cortiça), permitindo aproveitar a suas propriedades térmicas e acústicas como material para a construção [17].

e) Fibra ou Fio da madeira

As fibras da madeira são células extremamente afiladas de diâmetro variável e reduzido, fortemente aglomeradas, que no seu conjunto conferem propriedades resistentes de suporte à árvore, estando o seu alinhamento longitudinal posicionado ao longo do eixo do tronco. Tem uma grande importância no comportamento físico-mecânico da madeira, já que a sua orientação diferencia as suas propriedades resistentes [1].

f) Veios da madeira

São todos os efeitos que se podem observar na face da madeira no plano radial e tangencial, é o conjunto dos fios da madeira dos anéis anuais e do grão que conferem uma textura característica a cada árvore.

3.3. PROPRIEDADES FÍSICAS DA MADEIRA

A madeira é um material higroscópico, anisotrópico (com três direções), visco-elástico e biodegradável. Estas propriedades distinguem a madeira de qualquer outro material na construção. Em termos físicos a sua caracterização é assente nos seguintes domínios.

2.3.1. TEOR DE ÁGUA

A madeira, sendo um material higroscópico, tende a equilibrar o seu teor de água em relação à temperatura e humidade ambiente. Sendo a água um componente indissociável da madeira, esta apresenta-se em duas formas: água saturada, que é a água impregnável nas células da madeira, e que a sua alteração pode fazer várias vezes as propriedades mecânicas do lenho, e água livre que se encontra

nos espaços celulares e intracelulares, com uma ligação débil às paredes celulares que leva a uma perda rápida por evaporação [1].

Assim sendo, quando se dá uma variação de humidade no teor de saturação das fibras, ocorre uma alteração das dimensões da peça, podendo gerar fenómenos de retração durante a secagem.

Os valores do teor de água andam na ordem dos 13 a 17% quando secas ao ar, e de 0% quando secas em estufas de secagem. Normalmente, considera-se que o teor de água de referência da madeira é de 12% [1]. Na maioria das espécies o teor de água saturada anda na ordem dos 25 a 30% [17].

O teor de água é calculado com a seguinte expressão:

$$H = \frac{\text{Massa do provete Húmido} - \text{Massa do provete seco}}{\text{Massa do provete seco}} \quad (3.1)$$

Quando a madeira está verde, isto é acabada de ser abatida, o teor de água pode ser maior que 100%, tendo mais água que material lenhoso. Após a exposição ao ar livre ela vai secando até atingir um equilíbrio com o meio ambiente, podendo esse equilíbrio ser maior ou menor que o ponto de saturação, podendo assim haver fenómenos de retração, caso o teor de água fique baixo da taxa de saturação das fibras [1].

2.3.2. RETRAÇÃO

A retração é comum na madeira devido à perda de água abaixo do TSF (Teor de Saturação das Fibras). Normalmente ocorre nas partes superficiais da madeira onde a secagem atua mais rápido, podendo causar fendas em várias direções devido a anisotropia do material, tendo maior expressão na direção tangencial e depois na direção radial [1].

Devido a esta anisotropia, a retração tem que ser analisada, não só pela **retração volumétrica total**, como também pela **retração tangencial total** e **retração radial total** [1]. Temos então, com indica a figura 3.3.2, a retração linear nas três direções principais (tangencial, radial e longitudinal) expressa em percentagem.

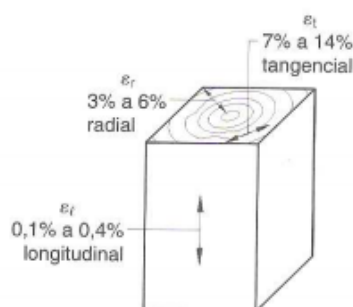


Figura 3.3.1 - Percentagem da retração em conformidade com as 3 direções principais.

Esta variação de retração nas três direções leva a que haja deformações e empenos que ocorrem durante a secagem e que podem ser agravados em zonas com lenho tracionado, provocando empenos mais acentuados nas peças de madeira.

Para que haja um bom controle da retração tem que haver uma boa relação entre a humidade de colocação da madeira e a humidade de equilíbrio que esta vai atingir ao longo do tempo de vida útil. A retração é muitas vezes medida com o coeficiente de retratilidade que nos indica o valor da variação volumétrica para cada 1% de variação da humidade a baixo do TSF que a madeira apresenta.

2.3.3. MASSA VOLÚMICA

A massa volumétrica da madeira é uma das propriedades mais importantes, já que é uma das referências principais para a classificação das suas propriedades físicas e tecnológicas. Por norma, as madeiras mais densas são mais resistentes e mais elásticas, mas mais difíceis de trabalhar. A massa volumétrica é uma relação entre o peso em kg e o volume, e é calcula através da seguinte expressão.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.2)$$

Em que:

ρ = Massa volumica em Kg/m³

m = Massa em Kg

v = volume em m³

Sendo a madeira um produto da natureza em contínuo desenvolvimento, dificilmente fornece valores de densidade fixos e constantes, estando a densidade correlacionada com fatores internos e externos a que a árvore foi sujeita. A principais causas da variação da densidade é a sua espécie florestal; depois, na mesma espécie florestal podemos ter densidades diferentes, devido à humidade e à variação da largura dos anéis de crescimento. Por norma, quando existe uma taxa de crescimento muito rápido a densidade é menor. Por isso, nos climas propícios a um crescimento rápido, a densidade da madeira pode ser menor e a sua resistência também.

3.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas da madeira são uma característica importante, visto que conhecendo bem as suas capacidades resistentes podemos dimensiona-la de forma económica.

Devido à sua anisotropia, a madeira comporta-se de diferentes maneiras quando a aplicação da força é feita paralelamente, ou perpendicularmente ao fio, dando-se por isso especial importância a sua coesão axial (resistência paralela ao fio) e coesão transversal (resistência perpendicular ao fio) [1].

Constasse que a resistência mecânica da madeira difere entre as várias espécies de árvores, havendo uma íntima relação entre densidade e resistência. Por isso, tem que ser ter em conta que a mesma espécie de árvore pode ter resistências mecânicas diferentes; árvores em climas propícios a um crescimento rápido apresentam densidade mais baixa, o que se pode traduzir em menor resistência.

Também há que ter em conta os defeitos apresentados na madeira, como fendas, número de nós, desvio das fibras, que podem reduzir a sua resistência mecânica. Na figura 3.4.1 estão indicadas as direções dos esforços que podem atuar numa uma peça de madeira.

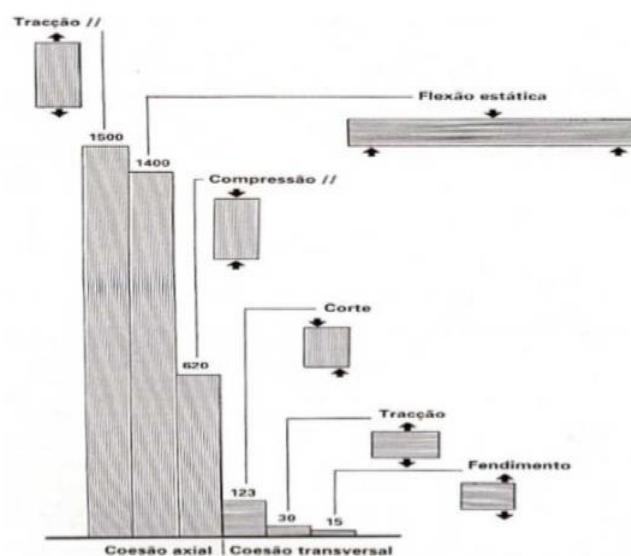


Figura 3.4.1 - Resistência do pinho bravo e solicitações mecânicas em várias direções. [1]

2.4.1. RESISTENCIA A COMPRESSÃO.

A resistência compressão de uma peça de madeira na direção paralela das fibras ronda os 16 a 34 MPa, sendo apenas 40 % do que a mesma madeira resistiria a tração paralela as fibras [3].

Quando é aplicada uma força de compressão paralela as fibras, acontece um afastamento das fibras da madeira, perdendo-se a coesão entre elas, até que se atinge uma rotura global. No início da aplicação desta força de compressão a peça de madeira apresenta um comportamento elástico, mas quando a força está próxima do limite de rotura, a peça adquire um comportamento plástico devido a rotura das fibras.

Em relação a compressão perpendicular as fibras estima-se que esta tenha $\frac{1}{4}$ da resistência ao esmagamento da compressão paralela, isto porque as células vão tender a encurtar no sentido perpendicular onde tem menor resistência. Na figura 3.4.2 estão representadas estas duas forças de compressão.

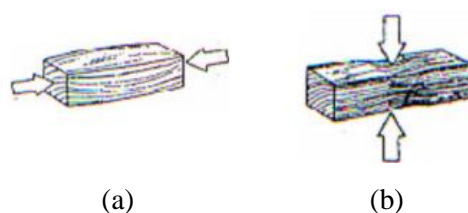


Figura 3.4.2 - (a) Compressão paralela as fibras; (b) Compressão perpendicular as fibras [4]

2.4.2. RESISTENCIA A TRAÇÃO

A tração na madeira pode ocorrer no sentido perpendicular e paralelo; sendo um material anisotrópico, as respectivas resistências diferem muito entre si. A resistência à tração paralela ao fio tem valores muito mais elevados que a tração perpendicular ao fio, porque está apenas ocorre devido à rotura das células fibrosas ou ao deslizamento entres estas, enquanto que nas roturas a trações paralelas às fibras a rotura ocorre devido à quebra das aderências entre o material fibroso, [1]. Visto isto, pode-se concluir que a

densidade da madeira no caso da resistência perpendicular as fibras, não nos vai dar uma base de comparação com a sua resistência.

Devido à grande debilidade das peças madeira aos forçoso de tração perpendicular, estas devem ser dispostas numa posição que evite estes tipos de solicitações.



Figura 3.4.3 - (a) Tração paralela as fibras; (b) Tração perpendicular as fibras [4]

2.4.3. RESISTÊNCIA A FLEXÃO

Quando se aplica flexão positiva a uma peça de madeira, atuam diferentes tipos de esforços: compressão paralela às fibras na parte superior da peça, tração paralela às fibras na parte inferior e esforços de corte [4].

Uma propriedade muito característica da madeira é a sua flexibilidade; quando está sujeita a esforços flexores, apresenta 3 fases distintas [1]:

- 1º Período: deformação elástica, isto é proporcional à carga aplicada
- 2º Período: grandes deformações não proporcionais à carga
- 3º Período: desfibramento ou rotura

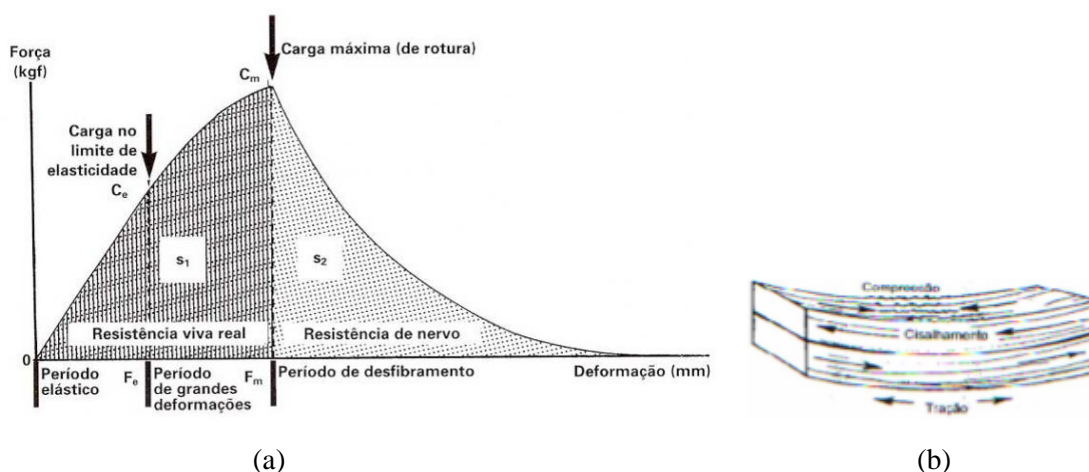


Figura 3.4.4 - (a) Diagrama de força /deformação em ensaio de flexão estática [1].; (b) Flexão na madeira [4].

Assim sendo, até a carga limite de elasticidade a madeira pode ser carregada e descarregada voltando sempre a sua posição inicial. Se for aplicada uma carga superior à carga limite de elasticidade, a madeira plastifica não voltando ao seu estado inicial. Com a aplicação de carga até a carga de rotura, começa a dar-se o desfibramento.

2.4.4. RESISTÊNCIA AO CORTE

A resistência ao corte dá-se em três direções: perpendicular às fibras, no sentido paralelo às fibras e no sentido perpendicular aos anéis de crescimento. A primeira situação é a menos comum, pois antes de

acorrer o corte ocorrem danos graves devido a compressão normal; a mais frequente é o corte paralelo ao plano das fibras, onde as fibras tendem a deslizar uma sobre as outras; na terceira situação, também mais comum, as fibras rolam umas sobre as outras de forma transversal em relação ao eixo longitudinal [4].

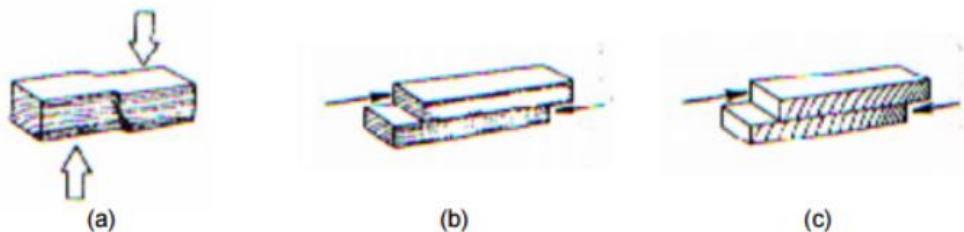


Figura 3.4.5 - (a) Corte perpendicular as fibras; (b) corte paralelo ao plano das fibras; (c) corte transversal em relação ao eixo longitudinal. [4]

2.4.5. CLASSES RESISTENTES DA MADEIRA

Atualmente, as classes de resistência da madeira maciça estão normalizadas segundo a EN338, onde se definem a resistência ao corte, à flexão, o módulo de elasticidade entre outras propriedades.

A norma considera duas grandes classes de madeira, as resinosas e folhosas, identificadas com C as madeiras resinosas e com D as madeiras folhosas. Na Tabela 3.4.1, estão representados todos os valores das propriedades mecânicas das madeiras maciças [11].

Tabela 3.4.1 - Tabela das classes resistentes da madeira segundo a EN338

Choupo e Espécies Resinosas														Espécies Folhosas						
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70		
Propriedades de resistência mecânica (N/mm ²)																				
Flexão		14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70	
Tracção paralela		8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42	
Tracção perpendicular		0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	
Compressão paralela		16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	23	25	26	29	32	34	
Compressão perpendicular		2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5	
Corte		1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0	
Propriedades de rigidez (kN/mm ²)																				
Módulo de elasticidade paralelo	Média E _{0,mean}	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20	
	5º quantil E _{0,5%}	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8	
Módulo de elasticidade perpendicular	Média E _{90,mean}	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,64	0,66	0,75	0,93	1,13	1,33	
Módulo de distorção	G _{mean}	0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,08	1,25	
Densidade (kg/m ³)																				
Valor característico	ρ _k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	590	650	700	900	
Média	ρ _{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080	
Nota: Os valores contidos no presente quadro referem-se a valores obtidos em provetes condicionados para 20°C de temperatura e 65% de humidade relativa do ar, condições que, em média, conduzem a um teor em água na madeira à volta dos 12%.																				

A madeira maciça não é a única a ser usada como componente estrutural, também existe a madeira lamelada-colada. Estas podem ser homogêneas quando provêm do mesmo tipo de madeira, ou combinadas quando têm dois tipos de madeira na sua constituição. Na tabela 3.4.2 estão representados os valores resistentes de madeira lamelada-colada homogênea e na tabela 3.4.3 os valores resistentes da madeira lamelada-colada combinada.

Tabela 3.4.2 - Classes de resistência da madeira lamelada-colada homogênea

Glulam strength class		GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 36h
Bending strength	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Tension strength	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
Compression strength	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31
	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
Shear strength	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Modulus of elasticity	$E_{0,g,mean}$	11 600	12 600	13 700	14 700
	$E_{0,g,05}$	9 400	10 200	11 100	11 900
	$E_{90,g,mean}$	390	420	460	490
Shear modulus	$G_{g,mean}$	720	780	850	910
Density	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

Tabela 3.4.3 - Classes de resistência da madeira lamelada-colada combinada

Glulam strength class		GL 24c	GL 28c	GL 32c	GL 36c
Bending strength	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Tension strength	$f_{t,0,g,k}$	14	16,5	19,5	22,5
	$f_{t,90,g,k}$	0,35	0,4	0,45	0,5
Compression strength	$f_{c,0,g,k}$	21	24	26,5	29
	$f_{c,90,g,k}$	2,4	2,7	3,0	3,3
Shear strength	$f_{v,k,g}$	2,2	2,7	3,2	3,8
Modulus of elasticity	$E_{0,g,mean}$	11 600	12 600	13 700	14 700
	$E_{0,g,05}$	9 400	10 200	11 100	11 900
	$E_{90,g,mean}$	320	390	420	460
Shear modulus	$G_{g,mean}$	590	720	780	850
Density	$\rho_{g,k}$	350	380	410	430

2.4.6. MADEIRAS UTILIZADAS NA CONSTRUÇÃO.

Sendo o pinheiro a árvore mais abundante em Portugal, também era a mais utilizada para fins construtivos, embora outras espécies também fossem utilizadas. Aqui referem-se algumas das mais utilizadas para a construção no nosso país:

- O **carvalho** (*Quercus faginea*) é comum nas províncias de Trás-os-Montes e Alto Douro e Beiras, é uma madeira folhosa, dura, moderadamente pesada e fácil de trabalhar, sendo das madeiras mais resistentes e duradouras na construção.

- O **castanheiro** (*Castanea sativa*), frequente nas províncias de Trás-os-Montes e Alto Douro, Beiras e Algarve, também é folhosa, tem cor pálida, com textura grosseira, dura, fácil de trabalhar e leve. Devido a sua impermeabilidade costuma ser aplicada nos telhados.
- O **pinheiro bravo** (*Pinus pinaster*), com cor pálida castanha avermelhada, é moderadamente dura, pesada, fácil de trabalhar, bastante resistente à água, mas pouco duradoura, sendo esta a mais abundante em Portugal. É também barata, mas tem a desvantagem de ser muito nodosa, fender com relativa facilidade e ser vulnerável a ataques de insetos xilófagos.

4

CARACTERIZAÇÃO DE PAVIMENTOS DE MADEIRA ANTIGOS

4.1. INTRODUÇÃO.

Neste capítulo vai ser dado a conhecer o sistema estrutural dos pavimentos de madeira da zona do Porto, os seus elementos estruturais, os tipos de vigas utilizadas, algumas medidas padrão e os vários tipos de apoios dos pavimentos.

Desde muito cedo que a madeira é utilizada na construção de edifícios, sendo um dos materiais mais utilizado entre o Séc. XVII e o Séc. XIX, por ser leve, fácil de transportar e fácil de trabalhar. Por isso, o que se pode verificar é que nos edifícios mais antigos, datados entre o Séc. XVII e o Séc. XIX, o material construtivo mais abundante era a madeira. Esta era utilizada na construção dos pavimentos, constituídos normalmente por vigas de madeira dispostas paralelamente entre si, onde posteriormente assentavam, perpendicularmente, as tábuas de soalho. A parte inferior do vigamento era ocultada por tetos trabalhados em estuque que eram suportados por ripas de madeira pregadas ao vigamento. Na figura 4.1.1 pode-se ver a parte inferior de um pavimento de madeira do fim do Séc. XIX, onde foi retirado o teto em estuque, podendo-se ver o soalho, o vigamento e as ripas de madeira de apoio ao tecto estucado [5].



Figura 4.1.1 - Vista inferior de um pavimento de madeira do fim do Séc. XIX

4.2. VIGAMENTOS

Os vigamentos em madeira podem ser compostos por troncos pouco trabalhados, conhecidos como paus rolados, que são falquejados na parte superior e inferior para uma melhor fixação do soalho e das ripas de madeiras. Nalguns casos encontram-se paus rolados falquejados em quatro lados, que estão muitas vezes colocados no ponto de encontro entre os pavimentos e as paredes da fachada, para um melhor isolamento do pavimento nestas zonas. Só mais tarde, já no início do Séc. XIX começam a aparecer as vigas trabalhadas com secção retangular uniformizada.

O espaçamento entre vigas varia entre os 0,40m e os 0,70m em função do vão que tinham que vencer. Normalmente, a última e a primeira viga encostavam às paredes de alvenaria [6].

Só no início do Séc. XX, com o aumento da indústria metalúrgica na construção, começaram a colocar-se vigas metálicas nos pavimentos para vencer vãos superiores 7m. Até lá as vigas de madeira eram feitas para suportar vãos até 7m de comprimento [7].

As secções das vigas variam entre os 0,10m a 0,30m de diâmetro, em função do vão que tinham que vencer. Nalguns casos, o vigamento apresentava vigas de diferentes secções, umas de menor diâmetro que intercalavam com vigas de maior secção para promoverem uma maior homogeneidade ao pavimento [6].

No início do Séc. XX, as vigas começaram a ser produzidas com secções retangulares padronizadas com largura de 0,07m a 0,12m e altura de 0,18 m a 0,24 m. Por isso, é possível verem-se edifícios com vigas de pavimentos com secções circulares falquejadas e outras de secções retangular, resultantes de reforços efetuados nesta época [6].

4.3. APOIOS

As extremidades do vigamento normalmente eram apoiadas nas paredes de empena dos edifícios, sendo os topos das vigas protegidas com tinta de óleo, zarcão ou alcatrão, e penetrando na parede de alvenaria até 0.20m a 0,25m da sua espessura, o suficiente para garantir a sua estabilidade.

Em alguns casos a espessura de penetração do vigamento era de 2/3 da espessura da parede que lhe servia de apoio, chegando por vezes a penetrarem em toda a espessura da parede. Esta solução era má porque as cabeças das vigas ficavam mais expostas aos agentes erosivos [7].

Durante este trabalho foi possível observar pavimentos de madeira de edifícios adjacentes apoiados na mesma parede de alvenaria de empena.

Os apoios eram feitos de diversas maneiras. Uma das maneiras recorria à ajuda de um ferrolho/chapa em ferro pregada à cabeça da viga e embutida na parede, ou fixada do lado de fora. Este tipo de ligação aumentava a solidez do pavimento e diminuía a deformação e as vibrações dos pavimento, tendo o inconveniente de estarem muito sujeitos a corrosão. Para além disso promoviam uma melhor ligação entre paredes através das vigas de pavimento que funcionavam como tirantes [6].

Na figura 4.3.1 e figura 4.3.2, está representado um ferrolho de esquadro e um ferrolho com ligação ao exterior.

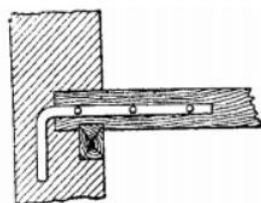


Figura 4.3.1 - Ferrolho de esquadro [6]

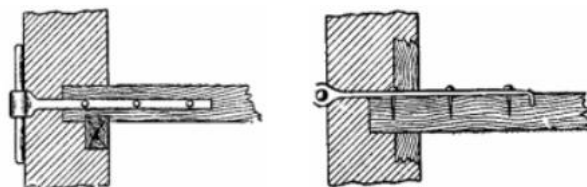


Figura 4.3.2 - Ferrolho com ligação ao exterior da parede [6]

Quando os pavimentos tinham que suportar grandes cargas, eram colocadas chapas de ferro, ou bocados de madeira, na parede que servia de apoio ao vigamento, para que o esforço fosse uniformemente distribuído pela parede. Isto podia acontecer quando as paredes eram menos resistentes a cargas pontuais (ex. paredes de tabique).

Noutros casos era aplicado um elemento transversal, com cerca 10x10cm² corrido ao longo da parede, conhecido como frechal, para distribuir as cargas uniformemente ao longo da parede. Na figura 4.3.3 podemos ver o exemplo de um frechal [6].



Figura 4.3.3 - vigas apoiadas num frechal [6]

Os apoios destes elementos podiam ser constituídos por chapas de ferro em consola, nas quais assentavam os frechais; ou com cavilhas chumbadas as paredes que finalizavam numa parte roscada que cruzava a viga de um lado ao outro, e que posteriormente era apertada por uma porca. Em alguns casos também eram embutidos cachorros no meio de parede de suporte para servirem de apoio; nalgumas situações os cachorros serviam de apoio direto aos vigamentos, na figura 4.3.4 podemos ver essas duas situações.

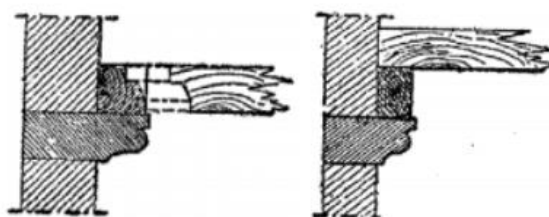


Figura 4.3.4 - Cachorro embebido na parede a dar apoio ao frechal. [6]

4.4. SOALHO

Os pavimentos eram revestidos normalmente por um tabuado, designado por soalho, usualmente em madeira de pinho, pregado ao vigamento e posicionado perpendicularmente a este. Tinham espessuras que variavam entre os 2,5cm e os 5,0cm, e largura entre 12cm e 30cm e um comprimento que poderia alcançar os 10m, dimensões estas que se foram reduzindo no início do Séc. XX. O tabuado do soalho era unido por um encaixe do tipo macho fêmea e posteriormente envernizado [7].

4.5. TARUGOS

Quando existem vigas de grandes comprimentos, estes elementos tendem a sofrer um fenómeno chamado de bambeamento. Isto acontece quando se aplicam grandes momentos fletores na viga que provocam compressões na parte superior da secção suficientemente elevadas para causarem instabilidade. Para evitar este fenómeno e melhor o comportamento do pavimento na direcção perpendicular às vigas, introduziam-se elementos de madeira perpendiculares ao vigamento (tarugos), espaçados entre si de 1,5m a 2,0m ao longo do vão. Encontram-se usualmente três tipos diferentes de tarugamento [6]:

- **Tarugamento simples:** tarugos em madeira com comprimento igual ao espaçamento entre vigas e colocados de baixo para cima, com secções iguais aos vigamentos e fixados em alguns casos com pregos em ambas as faces do tarugo ao vigamento. O comprimento deste não deve ser muito grande, porque com a variação teor de água os tarugos podem alagar causando grandes danos nas vigas do pavimento [6].



Figura 4.5.1 - Tarugamento simples em vigamentos de secção retangular: edifício do Largo de São Domingos, Porto [6]

- **Tarugamento de cruzetas:** são ripas de madeira de pequena secção (0,05x0,05m²) ligadas entre os vigamentos. O seu comprimento não deve ser três vezes superior à altura das vigas, uma vez que para ângulos pequenos a sua eficiência é reduzida. A figura 4.5.2 apresenta um exemplo de aplicação deste tarugamento com barras metálicas.



Figura 4.5.2 - Execução de tarugos em cruzeta [6]

- **Tarugamento Entalonado:** são usados na construção em cadeia e tem uma assemblagem complexa. Tem a mesma secção das vigas e são encaixados entre entalhes abertos nas vigas do pavimento, como está representado na figura 4.5.3

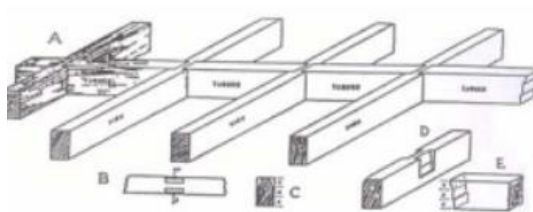


Figura 4.5.3 - Tarugos entalonados

5.

PATOLOGIAS EM PAVIMENTOS DE MADEIRA

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são tratados alguns dos defeitos da madeira resultantes da sua anatomia, do desgaste do meio ambiente em que estão inseridas e de más soluções estruturais implementadas.

5.2. PATOLOGIAS DE ORIGEM ANATÓMICA

4.2.1. FUSTE

Devido à própria genética da árvore e ao meio ambiente onde está cresce, o fuste pode ficar **torto**, **flexuoso**, **escasso** ou espiralado. Estes defeitos são detectáveis logo na produção da madeira e podem pôr em causa a sua qualidade na hora de ser utilizada para fins estruturais, como é o caso do fuste espiralado que está representado na figura 5.2.2, em que o seu aproveitamento para madeira estrutural é desastroso [1].

4.2.2. NÓS

Os nós nas peças de madeira correspondem a ramificações antigas; são como cicatrizes da madeira, sendo que algumas delas podem estar em melhor estado que outras, conferindo normalmente más propriedades resistentes, isto porque os nós vão implicar desvios do fio da madeira, o que leva a perdas de resistência mecânica das zonas onde estão inseridos, podendo ocasionar fendas [1].

Existem vários tipos de nós:

- Nós vivos, em que o nó é firme e aderente a madeira, resultante da parte inclusa do ramo enquanto vivo, tendo pouca afetação da capacidade resistente.
- Nós mortos, em que o nó pode apodrecer, e apresentar degradações fúngica, que podem infeccionar o cerne, causando maiores danos na resistência da peça de madeira [1].

4.2.3. INCLINAÇÃO DO FIO

A inclinação do fio pode acontecer devido ao natural crescimento da madeira, ou durante a serragem. Esta inclinação ocorre ao longo do eixo longitudinal e vai afetar as propriedades mecânicas da madeira,

variando em relação ao grau de inclinação do fio. Este defeito da madeira é mais importante quando temos peças comprimidas, e menos importante quando a peça está sujeita a tração ou flexão [1].

A inclinação do fio da madeira é comum em quase todas as árvores, dificultando a obtenção de correlações relativamente à resistência mecânica em peças de madeira da mesma espécie. Na figura 5.2.1, está representado um gráfico com alteração da resistência de compressão em relação a inclinação dos fios da madeira.

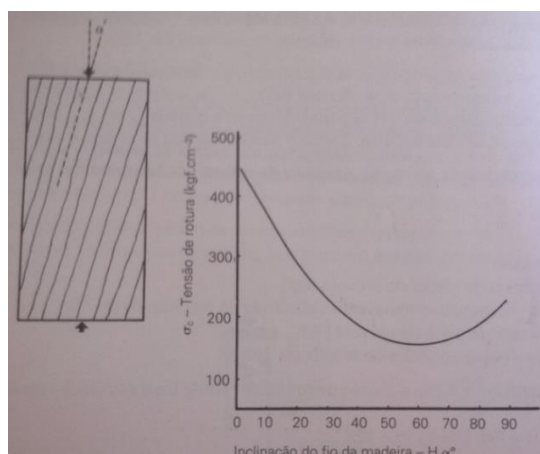


Figura 5.2.1 - Resistência a compressão em relação a inclinação do fio da madeira [1]

4.2.4. BOLSAS DE RESINA E SEIVA

Estas bolsas podem ser causas por traumatismos que provocam alteração da camada cambial. São bolsas que ocorrem nas madeiras resinosas, podendo-se encontrar no estado sólido, ou no estado líquido, reduzindo a propriedade resistente do material e tornando a madeira mais combustível ao fogo. [1]

Também existem as bolsas de goma que são parecidas com as bolsas de resinas, mas que ocorrem apenas em madeira de origem folhosa.

Sendo a seiva uma parte integrante da madeira, um dos maiores cuidados na aplicação da madeira na construção é a secagem completa da seiva, já que esta pode fermentar, quando em contato com o ar e a humidade, dando-se uma combustão que pode empenar as peças de madeira e apodrecê-las [7].

Na figura 5.2.2 pode-se observar uma bolsa de resina, um nó podre e um nó firme.

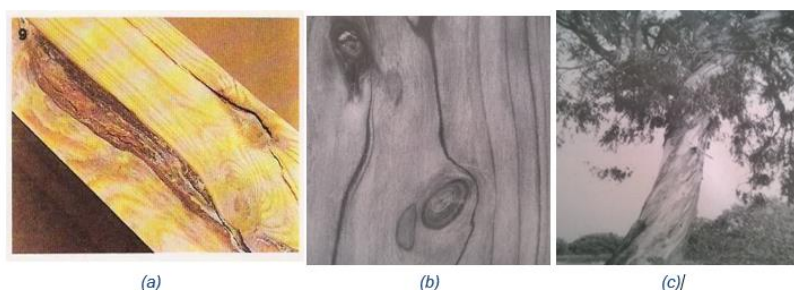


Figura 5.2.2 - (a) Bolsa de resina; (b) nó podre e nó firme; (c) fuste espiralado [1]

5.3. PATOLOGIAS DE ORIGEM ABIÓTICA

4.3.1. AGENTES ATMOSFÉRICOS

Os principais agentes atmosféricos degradantes da madeira são o sol e a chuva, que se podem combinar para uma degradação mais rápida da madeira.

Relativamente à chuva, através das infiltrações num edifício e pela capilaridade das paredes, a água pode chegar aos apoios do pavimento de madeira, humedecendo a parte superficial, levando a uma variação de humidade entre a superfície da madeira e o seu interior, que se encontra seco. Este fenómeno induz uma variação de tensões no interior na peça que provocam o aparecimento de fendas e curvaturas indesejadas [2].

Quando as peças de madeira ficam muito tempo expostas ao sol, estas começam a apresentar uma cor escura acastanhada e, posteriormente, cinzenta escura. Este fenómeno é devido à radiação ultravioleta que degrada principalmente a lignina, substância que confere rigidez à madeira. Posteriormente com a ajuda da água a lignina é eliminada, ficando exposta a camada seguinte [2].

Os raios infravermelhos da radiação solar provocam uma degradação na madeira quando há existência de bolsas de resina, ou quantidades de resina consideráveis na peça que vão sofrer um aquecimento devido a esta radiação, tendendo a expandir e a subir a superfície. Os raios infravermelhos também são os responsáveis pelo aparecimento de fendas devido ao aquecimento da madeira, nomeadamente pela redução da humidade superficial que resulta num diferencial de tensões entre a superfície e o seu interior, já que a parte superficial tende a retrair-se [2].

4.3.2. FOGO

A madeira começa a arder quando atinge temperaturas na ordem dos 400° C, tendo está um bom mequeníssimo de proteção, isto é, inicialmente há uma combustão muito rápida da madeira para depois se formar, devido aos resíduos da combustão, uma capa carbonizada 6 vezes mais isolante ao fogo que a madeira. Deste modo, o interior da madeira fica protegido e as suas propriedades inalteradas [2].

A combustão de madeira é proporcional à sua superfície e volume; quanto maior a superfície em relação ao volume da peça de madeira, mais rápida se dá a velocidade de combustão. Esta também está relacionada com a densidade da peça; em peças mais densas temos velocidades de combustão mais lentas [2].

As zonas mais sensíveis quando se dá um incêndio são normalmente as juntas em contato com peças metálicas e nos apoios as paredes de alvenaria de pedra, devida a sua condutividade térmica elevada [2].

4.3.3. QUÍMICOS

A madeira normalmente é bastante resistente aos produtos químicos, devido à sua acidez natural, com PH entre 5 e 4, embora quando em contato com ácidos fortes, ou substancias alcalinas durante períodos longos, estes possam afetar a madeira. No caso de ácidos fortes, eles vão destruir as cadeias de carbonos, deixando um vestígio de cor de podridão branca à superfície da madeira. Já com os agentes alcalinos, como algumas lixívia, degradam a lignina, fazendo com que as células percam resistência e consistência [2].

5.4. PATOLOGIAS DE ORIGEM BIÓTICA

A madeira sendo um material orgânico, tem o inconveniente de estar ligada com o ciclo alimentar e reprodutivo de alguns fungos e insetos que a vão degradando.

4.4.1. FUNGOS XILÓFAGOS

Os fungos xilófagos desenvolvem-se quando a madeira apresenta valores e humidade partir dos 18 a 20%, tendo uma reprodução ótima entre os 35 e 50% de humidade. São compostos por três grandes grupos: o mofo (bolor), os fungos cromogêneos e os fungos de podridão [2].

O bolor e os fungos cromogêneos não são muito invasivos na madeira, não a afetando mecanicamente, podendo ser detectados quando se verifica uma mudança da cor ao nível da superfície, para branca, preta ou azul escura. Estes podem não ser, numa fase inicial muito prejudiciais para a madeira, mas criam condições ideais para o aparecimento de **fungos de podridão** [2].

Os fungos de podridão são os grandes causadores da destruição da madeira, degradando as suas propriedades mecânicas. Inicialmente não são detectáveis a olho; numa fase intermédia pode-se ver uma mudança de cor da madeira e, posteriormente, reduções significativas do peso, podendo ocorrer a degradação completa da peça de madeira.

A podridão mais grave é a **podridão cubica**, que é identificada pela forma cubica que a madeira apresenta depois de ser desidratada por este fungo. Numa fase inicial observa-se uma cor castanha escura, e no final a madeira fica leve e quase sem resistência nenhuma, nalguns casos desfazendo-se nas mãos [2].

4.4.2. INSETOS XILÓFAGOS

Os insetos xilófagos podem-se distinguir em insetos de ciclo larvar e insetos sociais.

Nos insetos do ciclo larvar está inserido o **caruncho**. Trata-se de insetos que têm uma fase de larva que fica hospedada na madeira e que se vai alimentando desta até de tornar adulta. Normalmente só se alimentam do borne das madeiras secas, entre 10 a 14% de humidade, formando buracos com um diâmetro entre 6 a 12mm, podendo atacar o cerne se a madeira estiver também com fungos de podridão [2].

As térmitas pertencem aos insetos sociais, dividindo-se em dois grupos: térmitas subterrâneas e térmitas de madeira seca.

As **térmitas subterrâneas** fazem o seu ninho principal no solo, entrando nos edifícios por canais feitos pelas próprias que as levam às zonas com madeira. Vivem em zonas com humidade a rondar os 95%, temperaturas moderadas e ambientes com pouca luz. Na madeira, abrem galerias paralelas às direções das fibras, deixando uma capa exterior intacta para as proteger da luz, atacando as zonas mais moles da madeira (borne). Levam vários anos para conseguirem provocar danos nas estruturas de madeira, mas já houve casos em que apenas 3 anos bastaram para provocarem danos muito graves.

As **térmitas da madeira seca** atuam em madeira com humidade em torno dos 15%. A sua capacidade reprodutiva é muito baixa, e por isso as colónias são mais pequenas, mas têm uma capacidade de destruição mais elevada, podendo destruir a madeira em alguns meses. Uma das suas características são as entradas das galerias cobertas por uma secreção que forma uma película fina.

5.5. PATOLOGIAS DE ORIGEM ESTRUTURAL

Um dos defeitos estruturais mais comuns são as grandes flechas apreciáveis a olho nu, sendo sempre mais visíveis na madeira do em sistemas construtivos em betão e aço. Estas flechas excessivas podem ocorrer devido às secções reduzidas do vigamento, à existência de grandes espaçamentos entre vigas e à colocação em obra de madeira verde que faz acentuar a sua fluência [2].

Além das deformações, os pavimentos podem apresentar vibração exagerada, situação que tem como principal causa a insuficiência das secções dos vigamentos, a insuficiência dos tarugamento e também a existência de espaçamentos excessivos entre vigas [5].

Outra patologia estrutural muito comum em edifícios antigos é a insuficiência da resistência ao corte das vigas nos apoios em alvenaria de pedra, isto porque é um local onde a infiltração de água é mais fácil de ocorrer, podendo levar ao apodrecimento da secção e ao aparecimento de insetos xilófagos, que provocam uma diminuição da secção das estruturas [5].

Muitas vezes, em pavimentos antigos é comum ver-se lajetas de betão armado executadas sobre o pavimento de madeira, que em muitos casos não são isoladas com materiais impermeáveis entre o pavimento de madeira e a lajeta, havendo assim uma absorção da água do betão durante a cura para a madeira, podendo causar o seu apodrecimento [6].

Uma facto interessante é a desqualificação que houve na construção dos pavimentos de madeira com o passar dos séculos, visando torna-los mais económicos. Por isso temos edifícios no século XVII com pavimentos de melhor qualidade que outros construídos no século XIX e XX, executados com madeiras de menor qualidade, com secções reduzidas e maiores espaçamentos [6].

6.

INSPEÇÃO E DIAGNOSTICO

6.1. INTRODUÇÃO

Um trabalho de inspeção e diagnostico consiste na elaboração de estudos, eventualmente com recurso a métodos de ensaios medianamente destrutivos, ou não destrutivos, que permitam fazer um diagnóstico o mais preciso possível, que leve a uma identificação dos danos e das suas causas.

O trabalho de inspeção pode ter vários níveis de intrusão: numa fase inicial pode-se fazer uma inspeção mais geral, de reconhecimento do edifício; numa segunda fase podem-se efetuar inspeções mais localizadas, em zonas que foram identificadas como críticas na inspeção geral; e numa terceira fase fazem-se inspeções a zonas de difícil aceso, sendo esta uma inspeção mais intrusiva que pode levar, por exemplo, ao levantamento do soalho para análise do vigamento [2].

Depois de realizada a fase de inspeção e diagnostico, é elaborado o relatório de inspeção e diagnostico que serve para o dono da obra e aos profissionais perceberem qual o estado real do edifício e como se comporta, sendo uma ferramenta útil na identificação e justificação das ações de reabilitação a serem implementadas.

6.2. INSPEÇÃO COM RECURSO A ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

5.2.1. MARTELO E FORMÃO

O martelo e o formão são dois instrumentos de uso simples, mas que de uma forma expedita nos podem indicar a qualidade de uma peça de madeira. Através do som produzido do embate do martelo na madeira, podemos de uma forma comparativa analisar o som de uma madeira sã com uma que esteja deteriorada, identificando a existência de potenciais zonas degradadas, com vazios, fendas, etc. O formão permite analisar a dureza superficial das peças de madeira e compará-la com uma madeira que à partida se saiba que estar sã.

5.2.2. HIGRÔMETRO

Nos pavimentos de madeira é recorrente a detecção de humidade junto aos apoios por falta de impermeabilização das fachadas. Este instrumento permite a avaliação do teor de água presente na madeira, contribuindo para a percepção do potencial de ataque de agentes xilófagos. Considera-se que para valores superiores a 20% de humidade a madeira fica sensível ao aparecimento destes agentes

bióticos; este limite reduz-se para 18% quando a madeira já foi anteriormente atacada por agentes bióticos [6].

Assim, com uma inspeção periódica podemos prevenir algumas entradas de água localizadas e o aparecimento de agentes bióticos.

Este instrumento de inspeção também vai permitir uma caracterização das propriedades mecânicas dos elementos estruturais, em função de correlações do teor de água nas peças de madeira.

Na figura 6.2.1 pode-se visualizar a medição do teor de água, numa peça de madeira, efetuada por um higrômetro.



Figura 6.2.1 - Avaliação do teor de humidade de uma viga de madeira com recurso a higrômetro [6]

5.2.3. VIDEOSCÓPIO

Os vigamentos dos pavimentos de madeira são estruturas de difícil acesso, isto porque estão revestidos com os tetos pela face inferior e pelo solho na face superior, impossibilitando a sua visualização direta. O videoscópio vem assim facilitar a observação destas estruturas, sendo uma câmara com um cabo flexível que pode ser introduzido em pequenas ranhuras, ou em pequenas perfurações, permitindo ao operador observar com detalhe o vigamento do pavimento [6].

5.2.4. RESISTÓGRAFO

O resistógrafo é um instrumento muito prático na inspeção de estruturas de madeira; só necessita de um operador e é composto por um elemento perfurador e um dispositivos de recolha de dados de pequena dimensão.

O ensaio consiste na penetração de uma agulha de aproximadamente 1,3mm de diâmetro e 300mm de comprimento, a uma velocidade constante, para a qual é quantificada a energia necessária para a sua penetração. Os registos são depois impressos no dispositivo de recolha de dados, onde podemos fazer a leitura da densidade da madeira. Quanta mais energia necessária à penetração maior a sua densidade.

Este ensaio permite assim identificar zonas degradadas por ataques biótico, fendas e vazios, mas também permite, de uma forma aceitável, identificar a espessura do soalho e do vigamento. Na figura 6.2.2 pode-se observar um resitografo com o dispositivo de recolha de dados.



Figura 6.2.2 - Resistógrafo

Na figura 6.2.3 podemos ver os dados fornecido por um resistógrafo num pavimento de madeira, onde se pode tirar informações relevantes.

No exemplo da figura 6.2.3 pode-se ver uma quebra da resistência à penetração aos 2,5cm, o que à partida corresponde ao vazio entre o soalho e o vigamento, podendo-se assim estimar, com uma boa aproximação, a espessura do soalho. Depois, aos 23cm temos outra quebra da resistência de penetração que pode ser devida a algum vazio na viga, ou à passagem da viga para as ripas de madeira que sustentam o teto. Esta dúvida só poderá ser esclarecida através da utilização de outros instrumentos de inspeção.

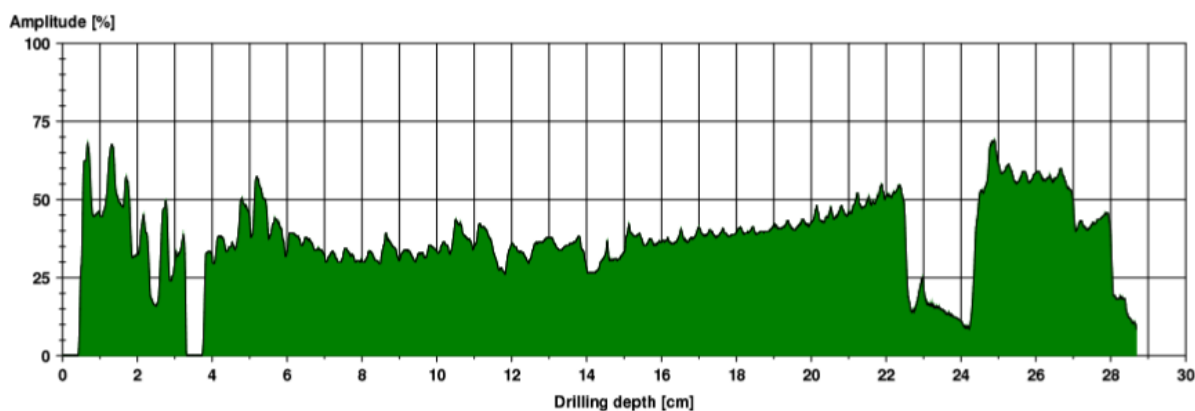


Figura 6.2.3 - Resultados obtidos a partir de um ensaio de um resistógrafo

Estima-se que para se terem valores fidedignos, devem-se efetuar 30 ensaios para cada peça, seguido de um tratamento estatístico dos resultados, para que se possam fazer correlações entre os valores do resistógrafo e valores das propriedades mecânicas da madeira, como a massa volúmica, a tensão de rotura por flexão paralela aos fios e o módulo de elasticidade na direção do fio. Estas correlações também variam em conformidade com a espécie botânica da madeira, sendo algumas mais fiáveis que outras [6].

5.2.5. PILODYN

O Pilodyn é um instrumento de inspeção, constituído por um pino metálico de 2,5mm de diâmetro, que é libertado por uma mola de rigidez conhecida, transformando energia potencial em energia de impacto.

Quando se dá o impacto, regista-se a profundidade do furo que nos indica a dureza superficial da madeira. Pode-se correlacionar estes dados com massas volúmicas e resistências à compressão.

Este ensaio serve de apoio a outros ensaios de inspeção, visto que tem algumas limitações, não só pelos valores baixos das correlações existentes com as características mecânicas da madeira, mas também pela agulha de pequeno comprimento que limita a ensaio à superfície da madeira [2].



Figura 6.2.4 - Exemplo de um Pilodyn

5.2.6. TÉCNICAS TERMOGRÁFICAS

Esta técnica de termografia é muito prometedora; consiste na análise da temperatura de irradiação da madeira a partir de imagens termográficas.

De uma forma geral, o ensaio consiste na identificação de zonas com perdas de densidade a partir de imagens termográficas, isto porque a madeira com densidades diferentes emite radiações térmicas diferentes, permitindo identificar zonas menos densas devido à existência de eventuais patologias [9].

Esta técnica também permite a verificação de insetos xilófagos como térmitas, já que, embora sejam de sangue frio, é possível observar a emissividade de radiação das bactérias que ajudam no seu metabolismo [9].

As imagens termográficas também permitem identificar zonas com humidade, visto que um alto teor de humidade da madeira tem emissividades de radiação mais baixas, localizando assim zonas de infiltração de água [9].

A termográfica é assim uma técnica que, de uma forma muito direta e simples, permite localizar em zonas abrangentes patologias na madeira.

Na figura 6.2.5 podem-se ver duas inspeções termográfica, onde se podem identificar térmitas e o teor de humidade em vigas de madeira.

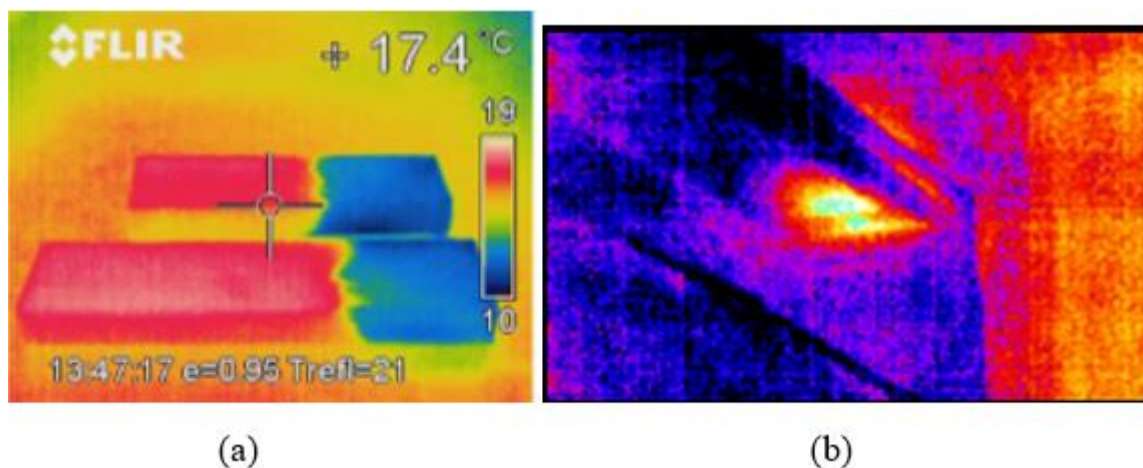


Figura 6.2.5 - (a) Imagem termográfica de 2 peças de madeira com diferencial de humidade; (b) imagem termográfica de térmitas numa viga de madeira

5.2.7. SISMÓGRAFO

Os ensaios com recurso a sismógrafos são recorrentes na inspeção de pavimentos de madeira de edifícios antigos. Este aparelho (figura 6.2.8) fornece leituras de acelerações em três direções, que posteriormente são analisadas e convertidas em gamas de frequências. A partir das frequências obtidas é possível estimar a rigidez de um pavimento, e assim avaliar o seu nível de conservação.

É também importante referir que quando os pavimentos de madeira estão bem caracterizados, no que diz respeito à densidade, módulo de elasticidade estático e geometria, este método de ensaio poderá dar boas referências sobre o tipo de apoio dos vigamentos (simplesmente apoiado, encastrado ou parcialmente encastrado). Estes ensaios são por isso um método complementar eficaz na determinação dos tipos de apoios que os vigamentos possam estar sujeitos.

Este ensaio foi o utilizado para a caracterização dos pavimentos de madeira da presente dissertação. Assim, mais à frente irá ser abordado o processamento de dados utilizado, com recurso ao *software* GeoDAS, bem como o procedimento utilizado na realização das leituras e outros detalhes da sua utilização.



Figura 6.2.6 - Sismógrafo 18-bits

7.

CASOS DE ESTUDO

7.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo, irão ser apresentados os edifícios estudados, nos quais foram selecionados e ensaiados alguns pavimentos de madeira com recurso a ferramentas dinâmicas. No total fizeram-se ensaios em 7 edifícios, dos quais 4 foram objeto de um estudo mais pormenorizado.

7.2. RUA DE CEDOFEITA

6.2.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL

O primeiro edifício analisado situa-se na rua de Cedofeita. É constituído por 4 pisos (piso 0, piso 1, piso 2 e piso 3), tem uma área retangular com 225m^2 e uma área de logradouro nas traseiras. A sua estrutura é constituída principalmente por paredes de alvenaria de granito e paredes de tabique de madeira. No meio do edifício desenvolve-se uma caixa de escadas em madeira que dá acesso a todos os pisos, e que é iluminada por uma claraboia central. Tem no alçado posterior, ao nível do piso 1 e do piso 2, duas varandas, e no alçado principal uma varanda no piso 1 que se estende a toda a largura do edifício.

À data do ensaio o edifício encontrava-se em processo de reabilitação, apresentando os pavimentos reabilitados e em boas condições, mas com a caixa de escadas ainda no seu estado inicial. O edifício era utilizado para habitação unifamiliar no piso 1, piso 2 e piso 3, e para comercio no piso 0 e cave, sendo estes dois últimos pisos constituídos por pavimentos de betão armado, e os restantes por pavimentos em madeira.



Figura 7.2.1 - Fachada do edifício da rua de Cedofeita

6.2.2. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

A estrutura principal do edifício é materializada por paredes exterior de alvenaria de pedra com uma espessura de aproximadamente 0,60m na fachada frontal e posterior, e de 0,25m nas paredes de empena. No interior, encontram-se algumas paredes de tabique de madeira em torno da caixa de escadas, com uma espessura de 0,10m, e no piso 0 existe uma parede de tijolo que oferece suporte aos vigamentos do piso 1.

Os pavimentos do piso 1, piso 2 e piso 3 são em madeira, com o viga apoiado em cantoneiras metálicas que lhe conferem uma aproximação a um apoio simples.

Apesar de no projeto estrutural fornecido pelo NCREP, o pavimento do piso 2 apresentar o reaproveitamento de algumas vigas originais, o que se verificou em obra foi a substituição de todas as vigas originais por vigas novas com secção de 10x24cm, espaçadas em 0,5m, e por tarugos com secção de 8x22cm, espaçadas em 2,6m.

Segundo os dados fornecidos pelo NCREP, os vigamentos e os tarugos são em madeira de pinho (classe resistente C18). Sobre estes assentam duas placas de aglomerado de madeira, com uma manta isolante entre ambas, que substituem o soalho. Esta placa de aglomerado estima-se que sejam em OSB 3.

Os valores característicos da densidade e do módulo de elasticidade usados para a caracterização do OSB foram retirados das tabelas técnicas da SmartPLY [12].

Na figura 7.2.2 e figura 7.2.3, podemos ver uma pormenorização dos apoios do viga e a geometria de todo o viga.



Figura 7.2.2 - Apoios do vigamento do edifício de Cedofeita



Figura 7.2.3 - Vigamento pavimentos de Cedofeita

6.2.3. MEDIÇÕES

Na figura 7.2.4 e figura 7.2.5 estão representadas as plantas estruturais do piso 1 e piso 2 do edifício em questão. Nestas plantas também estão identificados os pavimentos estudados, com as siglas PVC (Pavimento Cedofeita) e com a respectiva numeração. Também estão identificados os ensaios dinâmicos efetuados, referidos com as iniciais EDC (Ensaio Dinâmico Cedofeita) e a respectiva numeração. Estes resultados vão ser alvo de uma análise detalhada no capítulo 7.

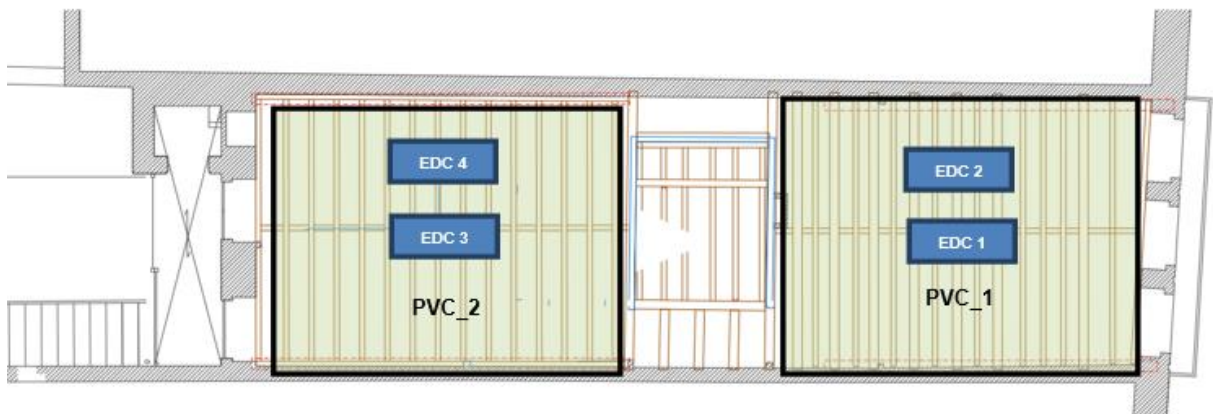


Figura 7.2.4 - Planta do piso 2, com identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

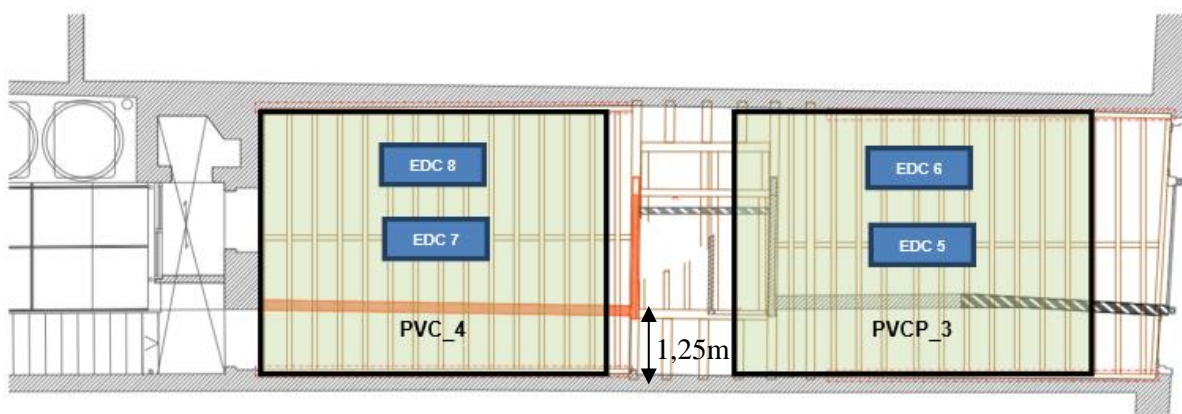


Figura 7.2.5 - Planta do piso 1, com identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

As medições dos vãos, secções e espaçamento foram feitas no local da obra, sendo que as medições do pavimento sobre a fachada da rua de Cedofeita não estão conformes com as plantas estruturais, fornecidas pelo NCREP. Estas medições são depois úteis para o desenvolvimento das simulações dos pavimentos com recurso ao *software Robot structural analysis*.

Na Tabela 7.2.1 e Tabela 7.2.2 estão indicadas todas as medições efetuadas nos pavimentos. Em relação os tipos de apoio são considerados indiretos quando apoiados em outras vigas e diretos quando apoiados nas paredes de alvenaria. Em relação ao apoio interior fora classificado com N os pavimentos sem apoio intermédio ao longo do vão do vigamento e com S os pavimentos com apoios intermédio. Isto é válido para todas as tabelas das medições dos vigamento e tarugos, no presente capítulo.

Tabela 7.2.1 - Medições dos vigamentos do edifício da rua de Cedofeita

Elemento	Vão (m)	Apoio interior	Espaçamento ente vigas	Secção média (bxh)
PVC_1	5,25	N	0,50 m	10x24 cm
PVC_2	5,25	N	0,50 m	10x24 cm
PVC_3	5,25	S	0,50 m	8x22 cm
PVC_4	5,25	S	0,50 m	8x22 cm

Tabela 7.2.2 - Medições dos tarugos do edifício da rua de Cedofeita

Elemento	Tipo de apoio		Número de tarugos	Tarugos	
	Esq.	Dir.		Secção (bxh)	Espaçamentos
PVC_1	Indireto	Indireto	1	10 X16 cm	2,63 m
PVC_2	Indireto	Indireto	1	10 X16 cm	2,63 m
PVC_3	Indireto	Indireto	1	10 X16 cm	2,63 m
PVC_4	Indireto	Indireto	1	10 X16 cm	2,63 m

7.3. PRAÇA CORONEL PACHECO

6.3.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL

O segundo edifício situa-se na praça Coronel Pacheco e é composto por 4 pisos (piso 0 ao piso 3) e duas fachadas com um comprimento de aproximadamente 6m. Tem como uso habitação unifamiliar.

Nas traseiras do edifício existe um logradouro com acesso pelo piso 0.

O estado geral do edifício é bom, tendo sido recentemente intervencionado. É constituído por paredes de alvenaria de pedra e por algumas paredes de tabiques interiores; os pavimentos e as escadas são em madeira, com as últimas a serem iluminadas por uma claraboia central no telhado.



Figura 7.3.1 - Fachada do edifício da Praça Coronel Pacheco

6.3.2. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

Ao nível estrutural, o edifício apresenta pavimentos em estrutura de madeira apoiados nas paredes de alvenaria de granito, com vãos de 3,40m e 1,80m no piso 0, e 5,20m nos restantes pisos, sendo que durante a intervenção alguns dos pavimentos foram reforçados com vigas com 14x20cm².

No piso 1 existe um pavimento de madeira cujo apoio é feito nas paredes de alvenaria de pedra de empena e numa parede de alvenaria a $\frac{1}{4}$ do vão, não apresentando tarugamento.

Os vigamentos originais, segundo os registos fornecidos pelo NCREP, são em castanho (classe resistente D30) e o soalho e as vigas de reforço em pinho (classe resistente C18). As paredes de alvenaria de granito conferem um encastramento parcial aos vigamentos.

Na figura 7.3.2 podem-se visualizar os acabamentos do pavimento PVCP_1



Figura 7.3.2 - Pavimento PVCP_1

6.3.3. MEDIÇÕES

Das figura 7.3.3 à figura 7.3.6 estão representados os esquemas estruturais dos diversos pisos, e indicam com a sigla PVCP (Pavimentos Coronel Pacheco), seguido de um número, os pavimentos que foram ensaiados com o sismógrafo. A localização dos ensaios é identificada pelas iniciais EDCP (Ensaio Dinâmico Coronel Pacheco).

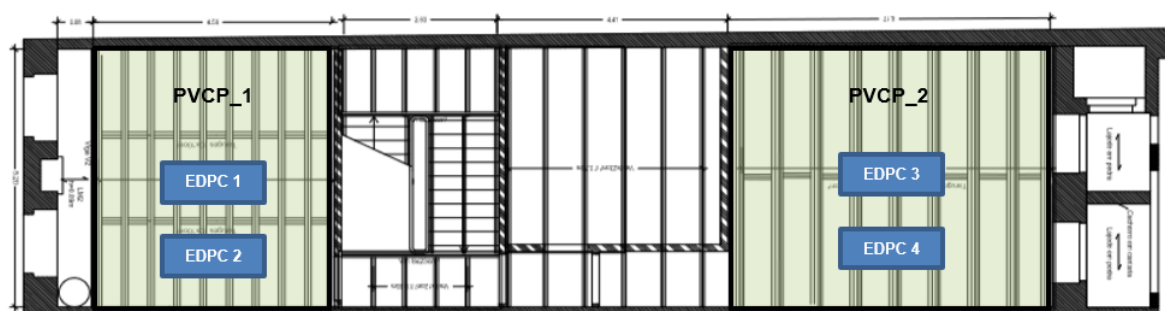


Figura 7.3.3 - Planta do piso 3, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos



Figura 7.3.4 - Planta do piso 2, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

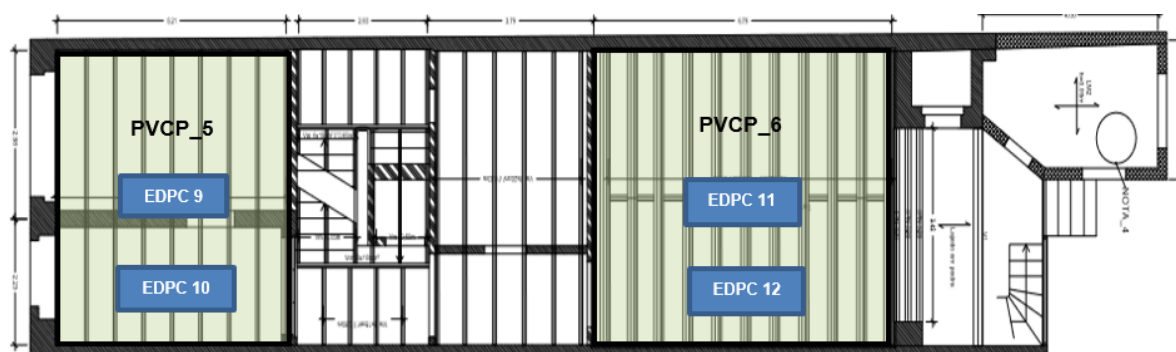


Figura 7.3.5 - Planta do piso 1, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

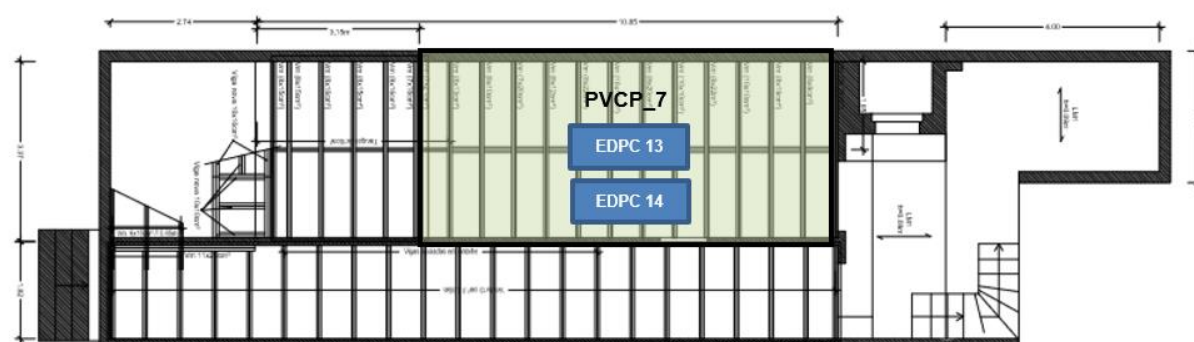


Figura 7.3.6 - Planta do piso 0, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

A Tabela 7.3.1 e Tabela 7.3.2 apresentam as geometrias dos elementos dos pavimentos de madeira. Como o pavimento no momento da inspeção apresentava com o soalho e os tetos colocados, os vãos, as secções das vigas, o número de tarugos e os espaçamentos foram obtidos através das plantas estruturais fornecidas pelo NCREP.

Tabela 7.3.1 - Medições dos vigamentos do edifício da praça Coronel Pacheco

Elemento	Vão	Apoio interior	Espaçamento ente vigas	Secção média (bxh)
PVCP_1	5,20 m	N	0,50 m	12x24cm
PVCP_2	5,20 m	N	0,73 m	8x23,0cm+14x20cm
PVCP_3	5,20 m	N	0,65 m	8x22,0cm+14x20cm
PVCP_4	5,20 m	N	0,73 m	8x20,0cm+14x20cm
PVCP_5	5,20 m	S	0,65 m	8x21cm
PVCP_6	5,20 m	N	0,63 m	8x20,0cm+14x20cm
PVCP_7	3,30 m	N		

Na descrição das secções medas na tabela 7.3.3 o “+” significa que às vigas existentes foram adicionadas novas. Por exemplo para o pavimento PVCP_2 temos uma secção original de 8x23cm² as quais foram adicionadas vigas novas com secção de 14x20cm².

Tabela 7.3.2 - Medições dos tarugos do edifício da praça Coronel Pacheco

Elemento	Tipo de apoio		Número de tarugos	Tarugos	
	Esq.	Dir.		Secção (b×h)	Espaçamentos
PVCP_1	Direto	Direto	2	10×10 cm	1,73
PVCP_2	Direto	Direto	1	10×10 cm	2,6
PVCP_3	Direto	Direto	1	10×10 cm	2,6
PVCP_4	Direto	Direto	1	10×10 cm	2,6
PVCP_5	Direto	Direto	-	-	-
PVCP_6	Direto	Direto	-	-	-
PVCP_7	Direto	Direto	-	-	-

7.4. RUA DO ALMADA E RUA ALFARES MALHEIRO

6.4.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL

O terceiro edifício localiza-se entre a rua do Almada e a rua de Alfares Malheiro, no Porto. É formado por 3 blocos, tendo sido objeto do estudo apenas o bloco principal disposto na rua do Almada, constituído por 5 pisos: piso 0 ao piso 4.

O edifício tem forma retangular, com paredes exteriores e as paredes de empena em alvenaria de pedra. No piso 4 as paredes exteriores são em tabique, existindo apenas aberturas no alçado posterior. As paredes interiores, os pavimentos e as escadas são em estrutura de madeira, estando as últimas iluminadas por uma claraboia central. Fruto de uma alteração anterior, foi criado um núcleo vertical no alçado posterior do edifício que se estende até ao 3.º piso.

O edifício teve ocupação comercial e de habitação; a sua estrutura encontra-se em bom estado geral de conservação.



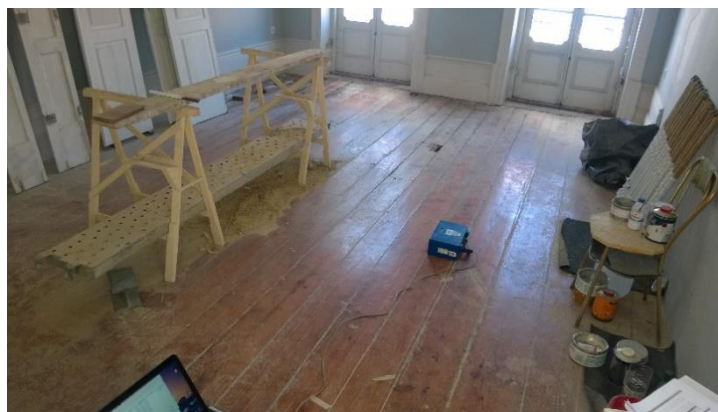
Figura 7.4.1 - Fachada do edifício da rua do Almada

6.4.2. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

As paredes de empena são em alvenaria de pedra e têm uma espessura de aproximadamente 0,40m, nas quais apoiam os vigamentos de madeira do pavimento. A espessura das paredes das fachadas varia entre 0,40m e 0,75m, sendo de folha dupla.

Os pavimentos de madeira são constituídos por vigas roladas com 0,16 a 0,18m de diâmetro, espaçadas entre 0,75m e 0,80m, e vencem um vão médio de 4,40m.

Os materiais identificados nos pavimentos foram: castanho (classe resistente D30) nos vigamentos, pinho (classe resistente C18) no soalho e gesso nos tetos trabalhados.



(a)



(b)

Figura 7.4.2 - (a) - Pavimento PVRA_3; (b) - Pavimento PVRA_6

6.4.3. MEDIÇÕES

Da figura 7.4.3 à figura 7.4.6 estão representadas as plantas estruturais dos pavimentos estudados com as iniciais PVRA (Pavimento da Rua do Almada) seguido de uma numeração. Também se enumeraram os ensaios dinâmicos efetuados em cada pavimento com as siglas EDRA (Ensaio Dinâmico Rua do Almada).

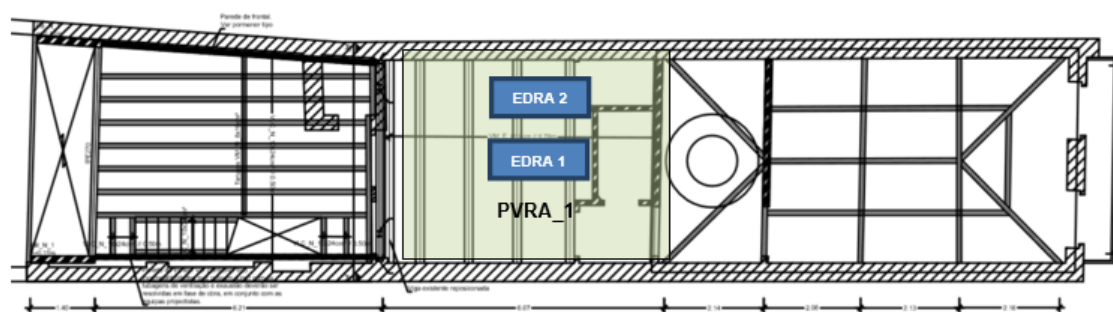


Figura 7.4.3 - Planta do piso 4, com identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

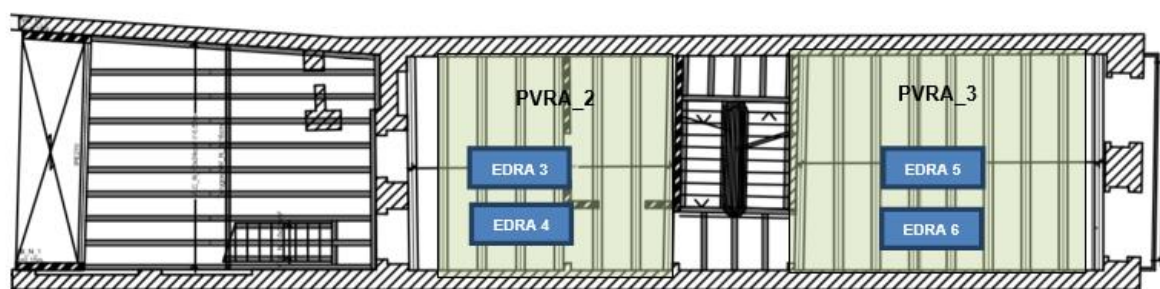


Figura 7.4.4 - Planta do piso 3, com identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

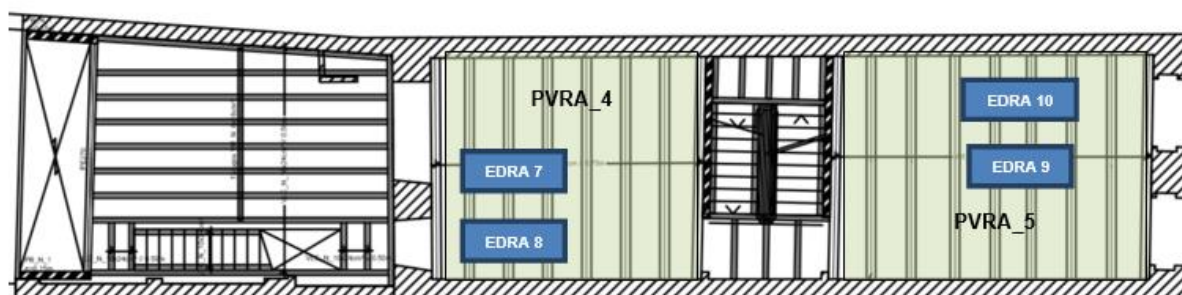


Figura 7.4.5 - Planta do piso 2, com identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

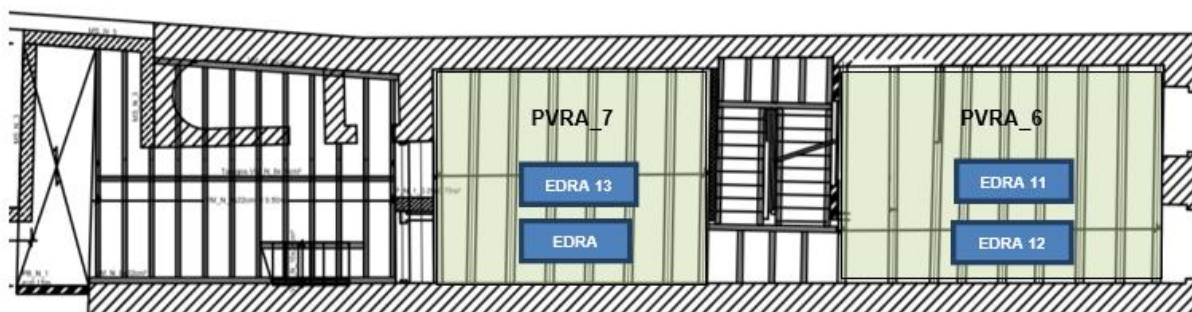


Figura 7.4.6 - Planta do piso 1, com identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

Na tabela 7.4.1 estão indicadas apenas as medidas dos vigamentos, visto que os pavimentos deste edifício não têm tarugamento. Os valores foram obtidos a partir das plantas estruturais fornecidas pelo NCREP.

Tabela 7.4.1 - Medições dos vigamentos do edifício da Rua do Almada e Alferes Malheiro

Elemento	Vão (m)	Apoio interior	Espaçamento ente vigas	Secção média (Ø)	Tipo de apoio	
					Esq.	Dir.
PVRA_1	4,35	N	1 m	18cm	Direto	Direto
PVRA_2	4,35	S	0,75 m	18cm	Direto	Direto
PVRA_3	4,35	N	0,75 m	18cm	Direto	Direto
PVRA_4	4,35	N	0,75 m	18cm	Direto	Direto

Elemento	Vão (m)	Apoio interior	Espaçamento ente vigas	Secção média (Ø)	Tipo de apoio	
					Esq.	Dir.
PVRA_5	4,35	N	0,75 m	18cm	Direto	Direto
PVRA_6	4,35	N	0,75 m	16cm	Direto	Direto
PVRA_7	4,35	N	0,75 m	16cm	Direto	Direto

7.5. RUA DO ROSÁRIO

6.5.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL

O quarto edifício situa-se na rua do Rosário e destina-se a habitação multifamiliar. Tem duas fachadas, é constituído por 5 pisos (piso 0 ao piso 4) em que o piso 4 é um desvão de cobertura que foi remodelado para ser habitável.

Tem paredes resistentes de alvenaria de granito e algumas paredes de tabiques interiores. No centro do edifício estão localizadas as escadas de madeiras que ligam os pisos, sendo iluminadas por uma claraboia central na cobertura. No piso 3 existem duas escadas independentes, de acesso ao desvão da cobertura.

O acesso ao logradouro localizado junto ao alçado posterior do edifício efetua-se através do piso 0. Apesar de se tratar de um edifício de habitação originalmente unifamiliar, atualmente, e depois de uma série de obras de intervenção/reabilitação (o edifício encontrava-se em fase de acabamentos), os pisos 1, 2 e 3 contêm dois apartamentos cada.

No bomba das escadas de acesso aos vários pisos esteve a funcionar um elevador que, entretanto, com as obras efetuadas foi retirado.



Figura 7.5.1 - Fachada posterior do edifício da Rua do Rosário

6.5.2. CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

A estrutura do edifício é constituída por paredes resistentes de alvenaria de granito, paredes de tabique no interior e pavimentos e cobertura de madeira. Os pavimentos apoiam-se nas paredes de alvenaria de granito que circunscrevem todo o edifício, e em algumas paredes de tabique interiores.

Nos restantes pisos as vigas são maciças, classificadas pelo NCREP como folhosas de classe resistente D30, com exceção do piso 4, em que as vigas dos pavimentos são vigas VLC (lameladas-coladas) 10x20cm², vencendo um vão máximo de aproximadamente 7m, com tarugos VLC 10x12cm².

Em todos os pavimentos o soalho foi classificado com C18 com 3cm de espessura.

6.5.3. MEDIÇÕES

Como o pavimento estava, no momento da inspeção, com o soalho e os tetos colocados, as medidas dos pavimentos foram obtidas através das plantas estruturais cedidas pelo NCREP.

A seguir estão indicadas as plantas estruturais dos pisos 1, 2, 3 e 4 do edifício, com a delimitação dos pavimentos que foram analisados neste caso de estudo, identificados com PVRR (Pavimento Rua do Rosário) e uma numeração, e uma representação esquemática dos ensaios identificados com EDRR (Ensaio Dinâmico Rua do Rosário) seguido de um número.

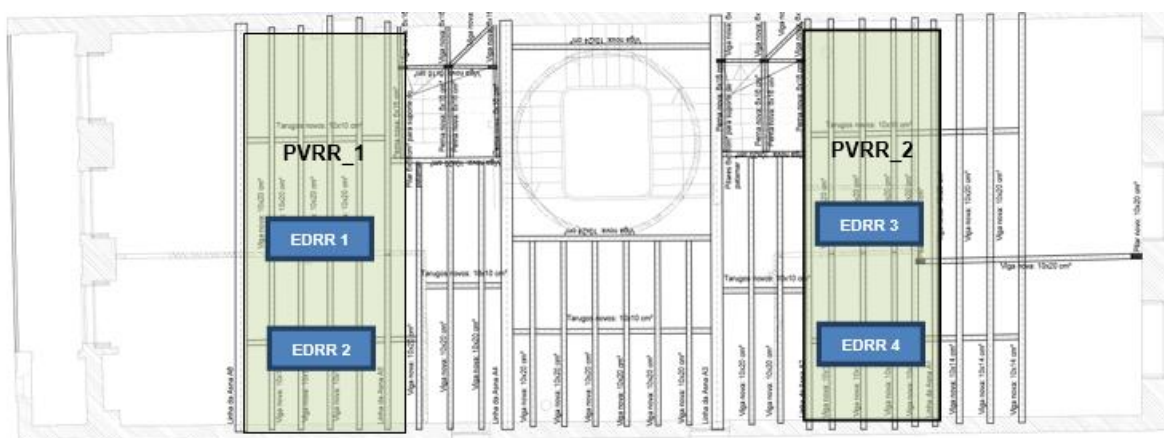


Figura 7.5.2 - Planta do piso 4, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

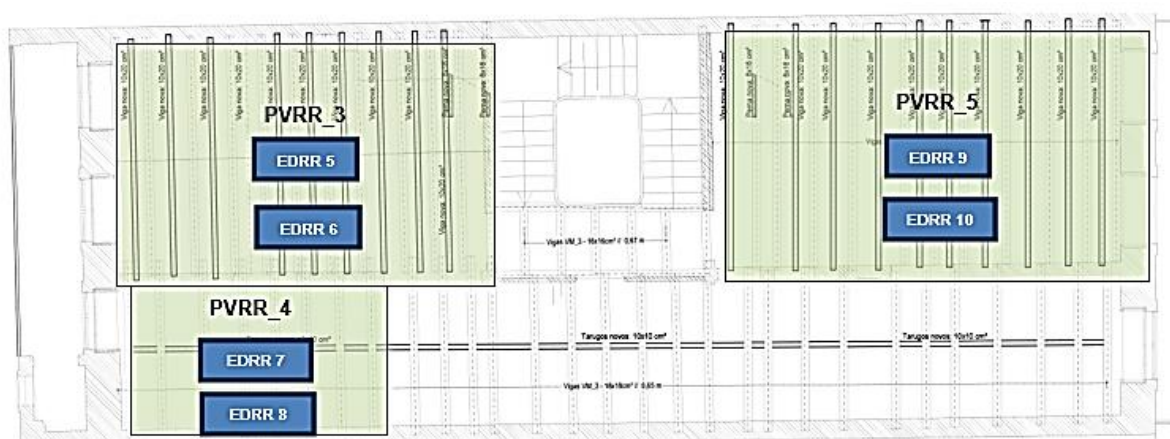


Figura 7.5.3 - Planta do piso 3, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

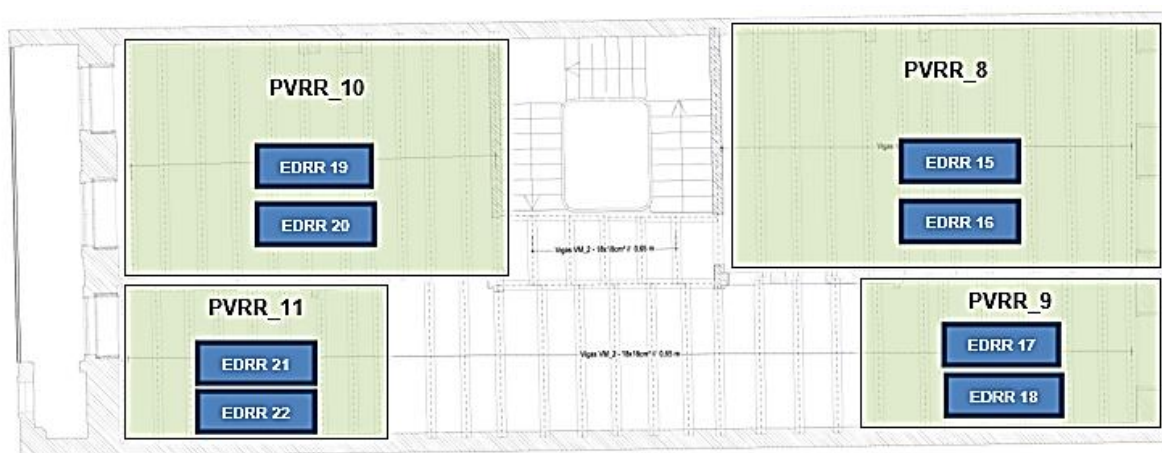


Figura 7.5.4 - Planta do piso 2, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

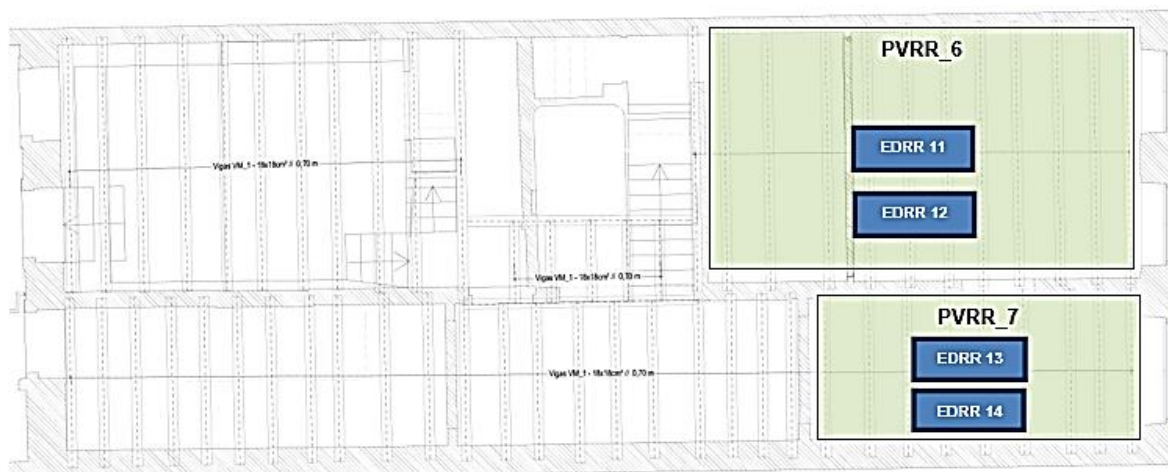


Figura 7.5.5 - Planta do piso 1, com a identificação esquemática dos pavimentos e ensaios dinâmicos

Foram medidos os vãos e as secções das vigas e dos tarugos, e os espaçamentos entre elementos, estando estes valores apresentados na tabela 7.5.1 e tabela 7.5.2

Tabela 7.5.1 - Medição dos vigamentos do edifício da Rua do Rosário

Elemento	Vão (m)	Apoio interior	Espaçamento ente vigas	Secção média (bxh)
PVRR_1	7,5	S	0,6 m	10x20cm
PVRR_2	7,5	S	0,6 m	10x20cm
PVRR_3	4,5	N	Ver nota 1	10x20cm + 16x16cm
PVRR_4	2,8	N	0,65 m	18x18cm
PVRR_5	4,5	N	Ver nota 2	10x20cm + 16x16cm
PVRR_6	4,5	N	0,70 m	18x18cm
PVRR_7	2,8	N	0,70 m	18x18cm
PVRR_8	4,5	N	0,65 m	18x18cm
PVRR_9	2,8	N	0,65 m	18x18cm
PVRR_10	4,5	N	0,65 m	18x18cm
PVRR_11	2,8	N	0,65 m	18x18cm

Tabela 7.5.2 - Tipo de apoios e medições de tarugos da Rua do Rosário

Elemento	Tipo de apoio		Número de tarugos	Tarugos	
	Esq.	Dir.		Secção (bxh)	Espaçamentos
PVRR_1	Indireto	Indireto	2	10x10 cm	3,45 m
PVRR_2	Indireto	Indireto	2	10x12 cm	4 m
PVRR_3	Direto	Direto	-		
PVRR_4	Direto	Direto	1	10x12 cm	1,50 m
PVRR_5	Direto	Direto	-		
PVRR_6	Direto	Direto	-		
PVRR_7	Direto	Direto	-		
PVRR_8	Direto	Direto	-		
PVRR_9	Direto	Direto	-		
PVRR_10	Direto	Direto	-		
PVRR_11	Direto	Direto	-		

Nota 1: Os espaçamentos entre vigas não são uniformes, porque foram aproveitadas algumas vigas existentes no edifício, com secção 10x20cm, e foram aplicadas novas vigas espaçadas de 0.67m com secção de 18x18cm.

Nota 2: no pavimento PVRR_ 5 sucede o mesmo que na Nota 1, mas com a diferença dos espaçamentos entra as novas vigas serem de 0,70cm.

8.

MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES COM RECURSO AO SISMÓGRAFO

8.1. PROCESSAMENTO DE SINAL

Os ensaios foram feitos com recurso a um sismógrafo facultado pelo LESE da FEUP, de 18-bit de resolução, com capacidade para fornecer leituras em três direções distintas, nos eixos x, y e z, correspondendo o eixo z às medições verticais que são as que mais nos interessam para a caracterização dos pavimentos de madeira.

O sismógrafo faz as leituras de acelerações através de um acelerómetros. Este sensor é composto por uma massa suspensa numa mola de rigidez conhecida, ligada a um transdutor de deslocamento, e envolvida num enrolamento que sofre deslocamentos provenientes de excitações exteriores. Os deslocamentos provocam uma corrente elétrica através de um resistor presente no enrolamento. Esta corrente elétrica é proporcional à aceleração do solo, que é medida pela voltagem gerada pelo resistor. [21]

As medições são posteriormente tratadas num programa computacional, o GeoDAS, que converte as acelerações fornecidas pelo sismógrafo em frequências. Para isso, são efetuados os seguintes passos sequenciais: (i) aplicação de filtros de balizamento, no qual se retiram as frequências a cima de 30Hz e a baixo de 2Hz; (ii) aplicação de uma *Baseline correction* a fim de repor a média dos valores registados em zero; (iii) e conversão das acelerações em frequência através da opção do programa GeoDAS, *Analyse Power spectra*.

Na figura 8.1.1 representa-se o gráfico das acelerações medidas pelo sismógrafo e na figura 8.1.2 o gráfico resultante da aplicação dos procedimentos anteriormente indicados, e que retratam os resultados de um dos pavimentos de madeira que foi alvo de estudo na presente dissertação.

Podemos assim observar que foi possível identificar 3 frequências de vibração do pavimento na direção vertical, nomeadamente a 11,57; 15,75; e 21,52HZ, correspondentes aos 3 modos de vibração.

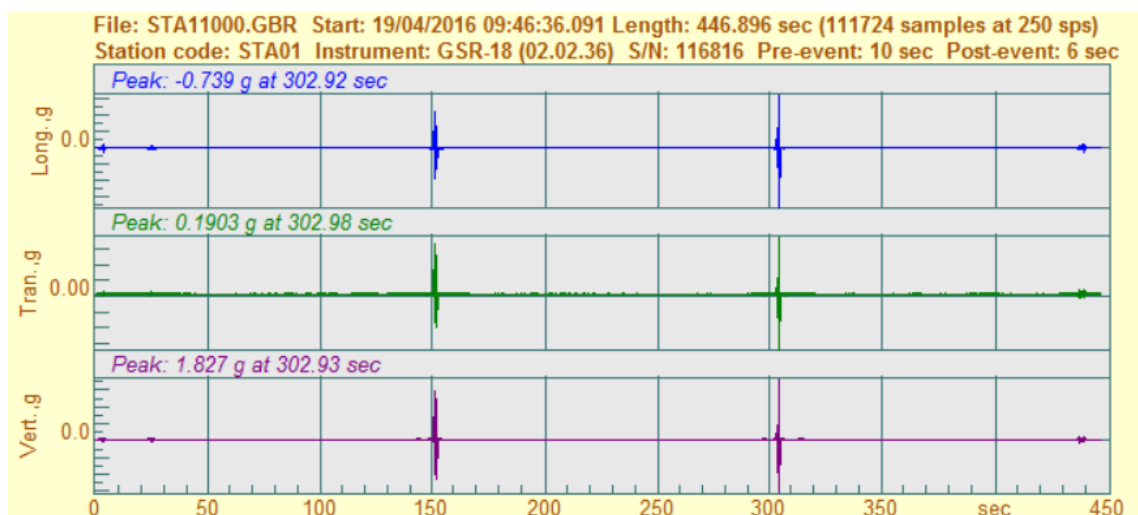


Figura 8.1.1 - Gráfico das acelerações de um pavimento de madeira medidas com recurso a um sismógrafo

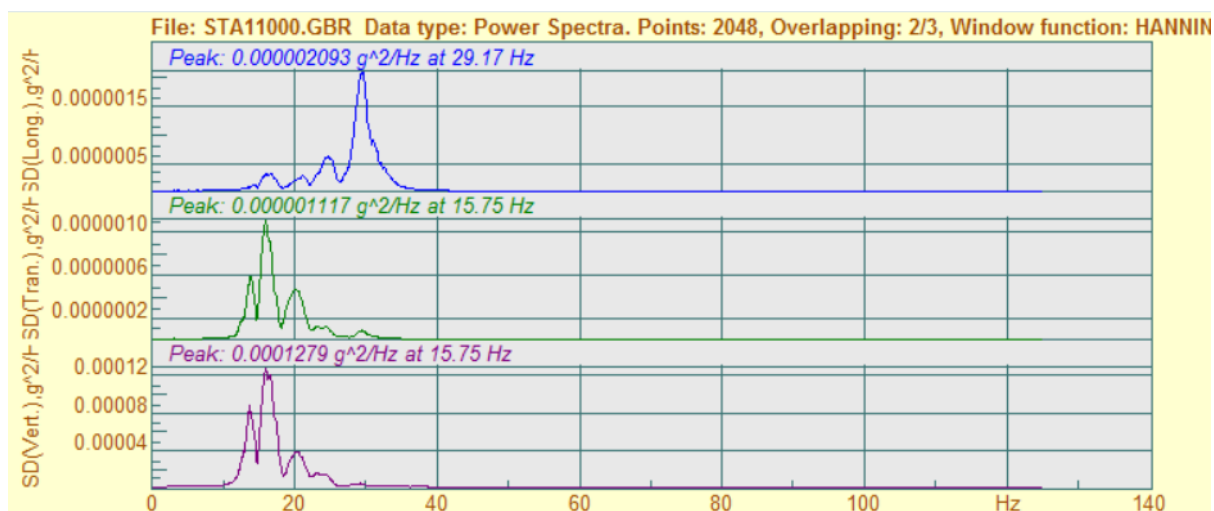


Figura 8.1.2 - Frequências de um pavimento de madeira tratadas com o GeoDAS

8.2. MEDIÇÕES DAS FREQUÊNCIAS DOS PAVIMENTOS DOS CASOS DE ESTUDO

Para a medição das frequências dos pavimentos de madeira, foram efetuados 2 ensaios em cada pavimento: no primeiro foi colocado o sismógrafo a meio do vão dos vigamentos e no segundo o sismógrafo foi colocado a um quarto de vão do vigamento, como mostra a figura 8.2.1. Depois do sismógrafo corretamente posicionado, os ensaios foram efetuados num tempo total de aquisição de seis minutos e impondo dois impulsos verticais (saltos no pavimento) espaçados de dois minutos.



Figura 8.2.1 - Metodologia aplicada nas medições dos pavimentos

Esta metodologia foi aplicada para se conseguir apanhar o primeiro modo de vibração que deverá estar associado a um movimento com amplitude máxima a meio vão do pavimento, e o segundo modo de vibração que deverá estar associado a um movimento com amplitude máxima a um quarto do vão do pavimento.

Durante o trabalho foi detectado um erro nas medições no segundo modo de frequência. Inicialmente pensava-se que a amplitude máxima do segundo modo de vibração se localizava a $\frac{1}{4}$ de vão do pavimento, o que se concluiu a partir dos modelos numéricos foi que a soalho e os tarugos, tem rigidez suficiente para condicionar o segundo e terceiro modo de vibração. Assim sendo o segundo modo de vibração tem amplitude máxima a $\frac{1}{4}$ do vão do soalho.

Por isso, como as medições foram feitas a meio do vão do soalho fazendo apenas variar a localização dos ensaios em relação ao vigamento, foi difícil detectar-se a amplitude máxima do segundo modo de vibração.

8.3. RESULTADOS DAS FREQUÊNCIAS DOS PAVIMENTOS DOS CASOS DE ESTUDOS

7.3.1. RUA DE CEDOFEITA

Durante os ensaios dinâmicos não ocorreram quaisquer perturbações de ruído ou vibração; apenas no piso PVC_3 existiam placas de aglomerado de madeiras empilhadas que poderiam alterar as frequências do pavimento pela massa adicional que impunham.

Tabela 8.3.1 - Resultados das frequências dos pavimentos da Rua de Cedofeita

Elemento	Ensaio Dinâmico	Frequências (Hz)			Vibração	Vão
		f1	f2	f3		
PVC_1	EDC_1 (1/2 Vão)	13,30	16,00	20,50	Forçada	
	EDC_2 (1/4 Vão)	13,30	15,99	20,00	Forçada	5,25
PVC_2	EDC_3 (1/2 Vão)	13,30	16,24	20,30	Forçada	
	EDC_4 (1/4 Vão)	13,10	16,11	20,30	Forçada	5,25
PVC_3	EDC_5 (1/2 Vão)	21,85		25,50	Forçada	
	EDC_6 (1/4 Vão)	21,90		25,80	Forçada	5,25
PVC_4	EDC_7 (1/2 Vão)	20,00		27,47	Forçada	
	EDC_8 (1/4 Vão)	20,00		27,34	Forçada	5,25

7.3.2. RUAS DO ALMADA E ALFERES MALHEIRO

Tabela 8.3.2 - Resultados das frequências dos pavimentos das Ruas do Almada e Alferes Malheiro

Elemento	Ensaio Dinâmicos	Frequências (Hz)			Vibração	Vão
		f1	f2	f3		
PVRA_1	EDRA_1 (1/2 Vão)	11,00	14,28	25,90	Forçada	4,35
	EDRA_2(1/4 Vão)	11,00	14,04	25,00	Forçada	
PVRA_2	EDRA_3(1/2 Vão)	14,77		24,20	Forçada	4,35
	EDRA_4(1/4 Vão)	15,01		25,00	Forçada	
PVRA_3	EDRA_5(1/2 Vão)	12,20	15,50	25,30	Forçada	4,35
	EDRA_6(1/4 Vão)	12,50	15,50	25,50	Forçada	
PVRA_4	EDRA_7 (1/2 Vão)	12,30	21,25	25,00	Forçada	4,35
	EDRA_8(1/4 Vão)	12,45	21,00	25,50	Forçada	
PVRA_5	EDRA_9 (1/2 Vão)	12,30	14,16	16,20	Forçada	4,35
	EDRA_10(1/4 Vão)	12,20	14,28	16,80	Forçada	
PVRA_6	EDRA_11 (1/2 Vão)	17,00	21,00	26,00	Forçada	4,35
	EDRA_12(1/4 Vão)	17,10	20,80	25,76	Forçada	
PVRA_7	EDRA_13 (1/2 Vão)	12,50	15,00	21,73	Forçada	4,35
	EDRA_14(1/4 Vão)	12,00	22,00	25,90	Forçada	

7.3.3. PRAÇA CORONEL PACHECO

Durante os ensaios no edifício da Praça Coronel Pacheco ocorreram alguns imprevistos. Houve alguma passagem de pessoas da obra durante os ensaios, especialmente nos pavimentos PVCP_4 e PVCP_5, e em cima do pavimento PVCP_6 existia uma banca em pedra de grandes dimensões com um peso estimado de 200kg.

As tabelas seguintes apresentam as frequências de vibração dos pavimentos, tendo na maior parte dos casos sido identificados dois modos de vibração.

Tabela 8.3.3 - Resultados das frequências dos pavimentos da Praça Coronel Pacheco

Elemento	Identificação do ensaio	Frequências (Hz)			Vibração	Vão (m)
		f1	f2	f3		
PVCP_1	EDCP_1 (1/2 Vão)	15,14		26,4	Forçada	5,2
	EDCP_2 (1/4 Vão)	16,90		26,4	Forçada	
PVCP_2	EDCP_3 (1/2 Vão)	17,60		20,26	Forçada	5,2
	EDCP_4 (1/4 Vão)	16,50		19,65	Forçada	
PVCP_3	EDCP_5 (1/2 Vão)	16,00	22,95	24,00	Forçada	5,2
	EDCP_6 (1/4 Vão)	16,50		25,63	Forçada	
PVCP_4	EDCP_7 (1/2 Vão)	14,89		19,4	Forçada	5,2
	EDCP_8 (1/4 Vão)	14,90		19,41	Forçada	
PVCP_5	EDCP_9 (1/2 Vão)	16,50	23,93	26,20	Forçada	5,2
	EDCP_10 (1/4 Vão)	17,30		31,25	Forçada	

Elemento	Identificação do ensaio	Frequências (Hz)			Vibração	Vão (m)
		f1	f2	f3		
PVCP_6	EDCP_11 (1/2 Vão)	10,70	13,79		Forçada	
	EDCP_12 (1/4 Vão)	11,00	13,92		Forçada	5,2
PVCP_7	EDCP_13 (1/2 Vão)	21,24			Forçada	
	EDCP_14 (1/4 Vão)	18,90	29,05		Forçada	3,3

7.3.4. RUA DO ROSÁRIO

Tabela 8.3.4 - Resultados das frequências dos pavimentos da rua do Rosário

Elemento	Ensaio Dinâmicos	Frequências (Hz)			Vibração	Vão
		f1	f2	f3		
PVRR_1	EDRR_1 (1/2 Vão)	18,80		29,10	Forçada	
	EDRR_2 (1/4 Vão)	18,43		29,00	Forçada	7,5
PVRR_2	EDRR_3 (1/2 Vão)	13,50		30,76	Forçada	
	EDRR_4 (1/4 Vão)	13,50		24,66	Forçada	7,5
PVRR_3	EDRR_5 (1/2 Vão)	13,70	17,82	24,00	Forçada	
	EDRR_6 (1/4 Vão)	17,94		28,00	Forçada	4,5
PVRR_4	EDRR_7 (1/2 Vão)	26,00			Forçada	
	EDRR_8 (1/4 Vão)	25,63			Forçada	2,8
PVRR_5	EDRR_9 (1/2 Vão)	12,00	14,65	16,20	Forçada	
	EDRR_10 (1/4 Vão)	12,20	14,53	16,00	Forçada	4,5
PVRR_6	EDRR_11 (1/2 Vão)	13,90	20,40	28,00	Forçada	
	EDRR_12 (1/4 Vão)	13,90		28,00	Forçada	4,5
PVRR_7	EDRR_13 (1/2 Vão)	20,90		26,25	Forçada	
	EDRR_14 (1/4 Vão)	20,90		27,34	Forçada	2,8
PVRR_8	EDRR_15 (1/2 Vão)	15,50		23,40	Forçada	
	EDRR_16 (1/4 Vão)	15,87		23,70	Forçada	4,5
PVRR_9	EDRR_17 (1/2 Vão)	19,80		28,81	Forçada	
	EDRR_18 (1/4 Vão)	21,10	25,2	29,54	Forçada	2,8
PVRR_10	EDRR_19 (1/2 Vão)	13,32	15,30	23,03	Forçada	
	EDRR_20 (1/4 Vão)	13,20	15,02	23,19	Forçada	4,5
PVRR_11	EDRR_21 (1/2 Vão)	22,46			Forçada	
	EDRR_22 (1/4 Vão)	21,60		32,59	Forçada	2,8

9.

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE
PAVIMENTOS

9.1. INTRODUÇÃO

A medição do comportamento dinâmico dos pavimentos, nomeadamente das frequências dos principais modos de vibração com forte componente de movimento vertical, para além de se relacionarem diretamente com o conforto regulamentar dos pavimentos, permite estimar as condições mecânicas e físicas dos pavimentos, ou das componentes que os constituem através da calibração, ou ajuste de um modelo numérico aos resultados experimentais. Em particular, procurou-se verificar a influência dos tetos, do soalho, dos tarugos e dos apoios das vigas nas extremidades. Para a realização das simulações numéricas, foi utilizado o programa de cálculo automático de análise estrutural *Autodesk Robot Structural Analysis*.

Este estudo envolveu um conjunto de pavimentos previamente selecionados tendo por base um conjunto maior de pavimentos medidos e referidos no capítulo 7. Foram assim selecionados 2 pavimentos de cada um dos 4 casos de estudo, que não sofreram quaisquer perturbações/vibrações, devidas as obras que decorriam no local, no momento da realização dos ensaios dinâmicos.

Assim sendo foram estudados os pavimentos PVRA_5 e PVRA_4 da rua do Almada; os pavimentos PVRC_1 e PVRC_2 da praça Coronel Pacheco; os pavimentos PVRR_1 e PVRR_8 da rua do Rosário e os pavimentos PVRC_1 e PVRC_3 da rua de Cedofeita.

9.2. VALORES TEÓRICOS

As frequências de vibração de uma estrutura qualquer dependem da sua geometria e das condições de fronteira, assim como da massa, inércia e módulo de elasticidade dos elementos que a constituem. No caso de um elemento simplesmente apoiado nas extremidades, são traduzidas pela seguinte equação simplificada do EC5:

$$f = \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \times \sqrt{\frac{EI}{m}} \times \frac{1}{2\pi} \quad (9.2)$$

Em que:

f = frequência própria de vibração(Hz);

l = comprimento do elemento (m);

E = módulo de elasticidade (KPa);

I = momento de inércia da área da seção transversal (m^4);

m = massa específica por unidade de comprimento (Ton/m);

n = número de ordem do modo de vibração(1,2,3...).

Tal como mostra a equação 9.2, a frequência natural de uma viga é tanto maior quanto maior for a sua rigidez e menor a sua massa. Por isso, nos pavimentos de madeira com tetos em gesso, tendencialmente a sua frequência diminui com o aumento da espessura dos tetos e aumenta com o aumento da espessura do soalho. Na figura estão representados os três primeiros modos de vibração de uma viga simplesmente apoiada nos dois extremos.

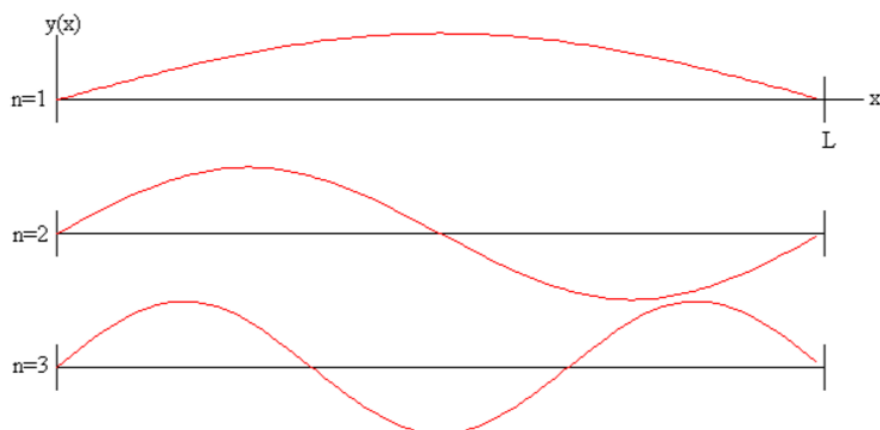


Figura 9.2.1 – Primeiros 3 modos de vibração fundamentais de uma viga na direção y

9.3. MODELO NUMÉRICO DOS PAVIMENTOS DO EDIFÍCIO DA RUA DO ÁLMADA

Construíram-se os modelos numéricos de simulação dos pavimentos PVAR_5 e PVRA_4 do edifício da rua do Almada. Na tabela 9.3.1 apresentam-se, de forma resumida, os valores das propriedades mecânicas consideradas para os 2 pavimentos analisados.

Tabela 9.3.1 - Propriedades mecânicas e geométricas dos pavimentos do edifício da rua do Almada

Pavimento		E (GPa)	ρ (KN/m ³)	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Grau de encastramento dos apoios (%)	Grau de encastramento nos tarugos (%)
PVRA_5	Vigas	10	6,7	Ø18		40	40
	Soalho	9	3,4		3		
	Tetos	1	27,0		2		
PVRA_4	Vigas	10	6,7	Ø18		40	40
	Soalho	9	3,4		3		
	Tetos	1	27,0		2		

Para o teto consideraram-se as propriedades de um revestimento de gesso, tal como referido em [22]. Na simulação do soalho foi considerada uma casca ortotrópica, com maior inércia na direção do soalho e inércia reduzida na direção perpendicular (direção das vigas). Na figura 9.2.1 estão representadas as medidas definidas para a casca ortotrópica.

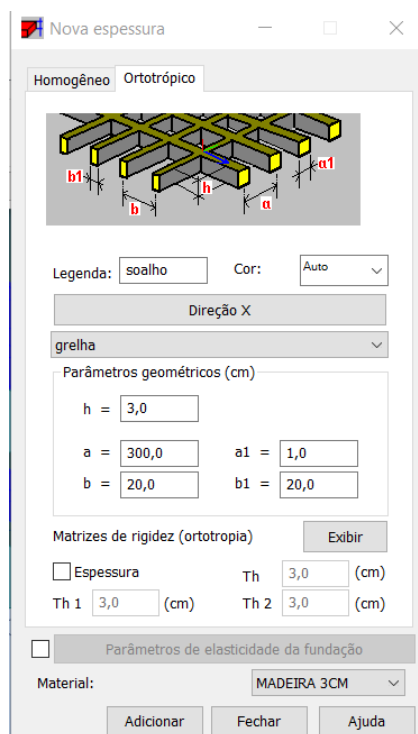


Figura 9.3.1- Características do modelo de casca para o soalho

Nas extremidades da casca ortotrópica considerou-se um apoio simples, restringindo-se apenas o movimento na direção vertical Z em consequência da restrição ao levantamento do soalho que as paredes de alvenaria de pedra e de tabique conferem.

O teto de gesso foi incluído no modelo de forma simplificada. Foi integrado na casca ortotrópica do soalho através da homogeneização do peso volúmico e do módulo de elasticidade do soalho e do teto na geometria da casca.

$$\rho(casca) = \frac{\rho_m.A_m + \rho_g.A_g}{A_m} = \frac{3,80 \times 0,03 + 27 \times 0,02 \times 1}{0,03 \times 1} = 21,8 \text{ KN} / \text{m}^3$$

$$E(casca) = \frac{E_m.I_m + E_g.I_g}{I_m} = \frac{9 \times 0,03^3 + 1 \times 0,02^3}{0,03^3} = 9,27 \text{ GPa}$$

Em que:

E = Módulo de elasticidade (GPa);

ρ = Peso volúmico (KN/m³);

A = Área da secção transversal (m²);

I = Momento de inercia da secção transversal (m⁴).

Os índices m e g referem-se à madeira e ao gesso, respectivamente.

Então, para um soalho com 3cm de espessura e um teto de 2cm de espessura, temos um peso volúmico e um módulo de elasticidade homogeneizados nos 3cm do soalho de $21,8\text{KN}/\text{m}^3$ e $9,27\text{GPa}$, respectivamente.

Um fator que influencia a frequência dos pavimentos é o posicionamento das vigas relativamente ao soalho, pois na realidade o soalho posiciona-se em cima do vigamento e não à cota do seu eixo. Fez-se assim uma comparação entre o comportamento dinâmico do pavimento PVRA_5 simulado numericamente com e sem offset, e com as vigas simplesmente apoiadas. A tabela 9.3.3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 9.3.2 - Comparação entre as frequências de vibração e a aplicação do offset (40% de encastramento das vigas na parede).

	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
C/offset	9,36	12,29	15,39
S/offset	7,45 (-11,25%)	8,43 (-26,97%)	10,70 (-0.24%)

Com a aplicação do offset no soalho foi então feito o próximo estudo relativamente ao grau de encastramento nos apoios. Este foi determinado por tentativas, até se conseguir uma boa aproximação às frequências experimentais. Para esta calibração utilizou-se o pavimento PVRA_5 que apresentava como frequências experimentais do primeiro, segundo e terceiro modo: 12,30Hz, 14,28Hz e 16,20Hz, respectivamente

Na tabela 9.3.2 estão indicadas as frequências numéricas obtidas supondo diferentes graus de encastramento das vigas nos apoios, para o pavimento PVRA_5.

Tabela 9.3.3 - Comparação entre as frequências de vibração e o respectivo grau de encastramento nos apoios

Grau de encastramento nos apoios	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
0%	9,36	12,29	15,39
10%	9,77 (4,38%)	12,59 (2,44%)	15,64 (1,62%)
20%	10,22 (9,19%)	12,94 (5,29%)	15,95 (3,64%)
30%	10,72 (14,53%)	13,33 (8,46%)	16,3 (5,91%)
40%	11,28 (20,51%)	13,79 (12,21%)	16,7 (8,51%)
50%	11,91 (27,24%)	14,3 (16,35%)	17,19 (11,70%)
60%	12,62 (34,83)	14,92 (21,40%)	17,78 (15,53%)
70%	13,45 (43,70%)	15,67 (24,50%)	18,52 (20,34%)
80%	14,44 (54,27%)	16,59 (34,99%)	19,49 (26,64%)
90%	15,63 (66,69%)	17,82 (45,00%)	20,85 (35,48%)
100%	17,15 (83,23%)	19,58 (59,32%)	23,04 (49,71%)

O valor do **grau de encastramento considerado para o modelo numérico foi de 40**, por corresponder a uma boa aproximação aos valores experimentais e por ser um valor que já tinha sido estimado anteriormente para casos idênticos de apoios de vigas em paredes de alvenaria de pedra [22]. Com estes resultados também se pode concluir que, percentualmente, a alteração do grau de encastramento dos apoios, altera percentualmente mais a frequência do primeiro modo de vibração do que dos restantes modos.

Recapitulando, para o modelo numérico PVRA_5 foram considerados 40% no grau de encastramento das vigas nas paredes (em torno do eixo X), um offset para posicionar o soalho sobre ao vigamento, uma casca ortotrópica a simular o comportamento do soalho e que inclui as propriedades do teto de gesso, e apoios simples verticais nas extremidades do soalho.

Nas figuras 9.3.1 e 9.3.2 está representada a planta estrutural do pavimento PVRA_5 e o modelo numérico PVRA_5 respectivamente.

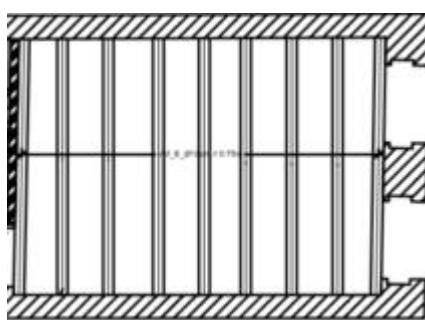


Figura 9.3.2 - Planta estrutural do pavimento PVRA_5

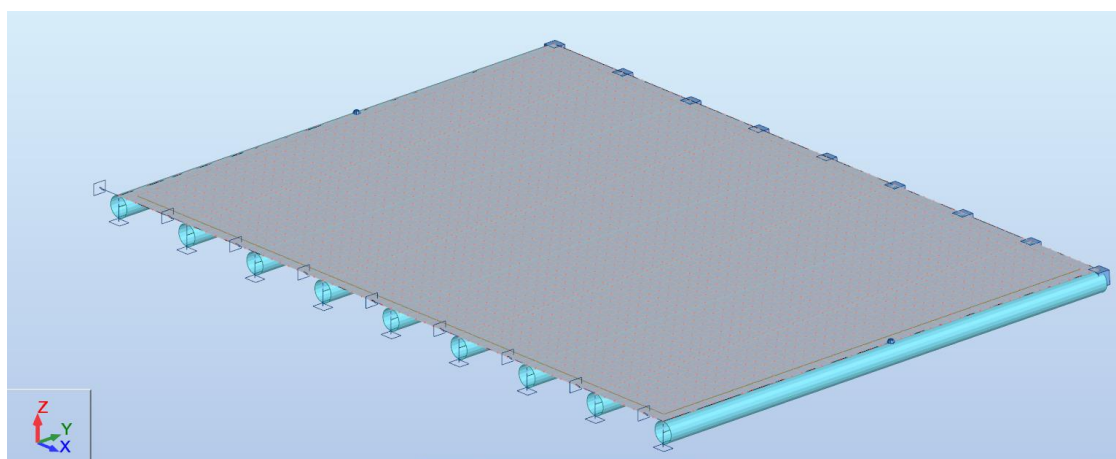


Figura 9.3.3 - simulação numérica do pavimento PVRA_5

O pavimento PVRA_4 difere do Pavimento PVRA_5 no número de vigas e numa divisória em parede de tabique existente em cima do pavimento, e que lhe confere uma restrição adicional. Assim, foram considerados apoios simples na direção vertical (Z) para simular o efeito dessa parede no pavimento. As características das condições de apoio e da casca ortotrópica para simulação do soalho e teto foram as consideradas para o pavimento PVRA_5.

Nas figuras 9.3.4 e 9.3.5 representam-se a planta estrutural do pavimento PVRA_4 e o respectivo modelo numérico.

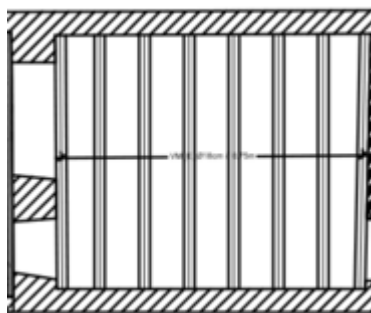


Figura 9.3.4 - Planta estrutural do pavimento PVRA_4

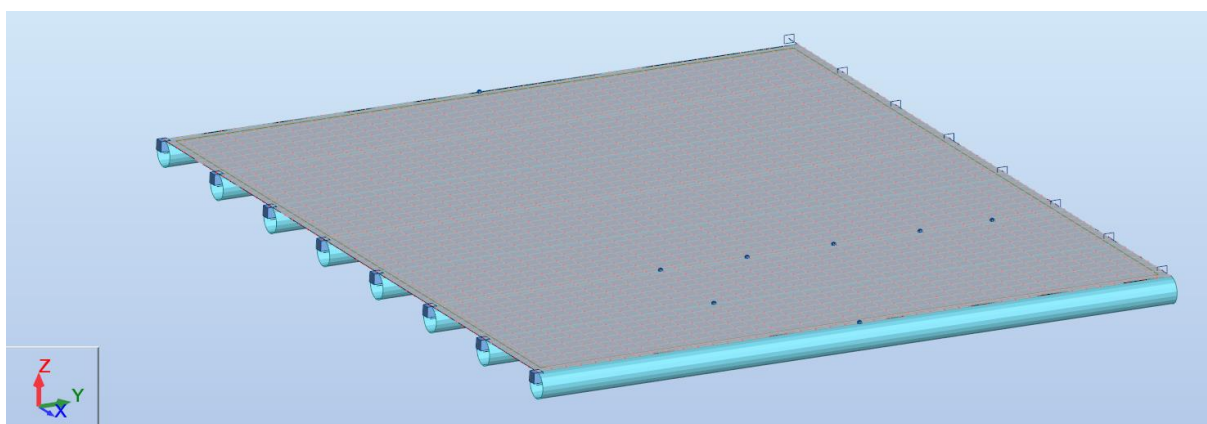


Figura 9.3.5 - simulação numérica do pavimento PVRA_4

Na tabela 9.3.4 estão indicados os valores das frequências dos três primeiros modos de vibração obtidos para os modelos numéricos PVRA_5 e PVRA_4.

Tabela 9.3.4 - Frequências de vibração dos modelos numéricos dos pavimentos da rua do Almada

Pavimentos	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
PVRA_5	11,28	13,79	16,70
PVRA_4	13,02	17,87	24,75

No Anexo A2 apresentam-se os modos de vibração dos modelos numéricos.

9.4. MODELO NUMÉRICO DOS PAVIMENTOS DO EDIFÍCIO DA PRAÇA CORONEL PACHECO

Para as simulações dos pavimentos do edifício da Praça Coronel Pacheco foram considerados os pressupostos dos pavimentos da rua do Almada, bem como a mesma casca ortotrópica, mas para uma espessura de soalho de 2,5cm. Na tabela 9.4.1 indicam-se as propriedades consideradas. Ao contrário dos pavimentos da Rua do Almada, este pavimento tem tarugos.

Tabela 9.4.1 - Valores das propriedades mecânicas e geométricas dos pavimentos da Praça Coronel Pacheco

Pavimento		E (GPa)	ρ (KN/m ³)	Base (cm)	Altura (cm)	Grau de encastramento nos apoios (%)	Grau de encastramento nos tarugos (%)
PVCP_1	Vigas	10	6,7	12	24	40	
	Tarugos	10	6,7	10	10		40
	Soalho	7,5	3,4		2,5		
	Teto	1	27		2		
PVCP_2	Vigas novas	9	3,4	8	23	40	
	Vigas	10	6,7	14	20	40	
	Tarugo	9	3,4	10	10		40
	Soalho	7,5	6,3		2,5		
	Teto	1	27		2		

De forma a calibrar o valor da rigidez das ligações vigas/tarugos, foram produzidos vários modelos numéricos, com os mesmos 40% de encastramento nos apoios das vigas nas paredes de alvenaria considerados nos modelos da rua do Almada, mas com diferentes graus de encastramento nas ligações vigas/tarugos. Para estas simulações foi utilizado o pavimento PVCP_1, cujos valores das frequências experimentais medidas para o primeiro e terceiro modos de vibração são: 15,14Hz e 26,4Hz, respectivamente.

Na tabela 9.4.2 apresentam-se os valores das frequências em função do grau de encastramento considerado nas ligações vigas/tarugos, na simulação numérica do pavimento PVCP_1.

Tabela 9.4.2 - Comparação entre as frequências de vibração e o respectivo graus de encastramento da ligação vigas/tarugos

Grau de encastramento (vigas/tarugos)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
0%	16,81	19,71	23,21
10%	16,84 (0,18%)	19,94 (1,17%)	24,02 (3,49%)
20%	16,87 (0,36%)	20,18 (2,38%)	24,86 (7,11%)
30%	16,9 (0,54%)	20,43 (3,65%)	25,73 (10,86%)
40%	16,93 (0,71%)	20,71 (5,07%)	26,63 (14,74%)
50%	16,97 (0,95%)	21,01 (6,60%)	27,57 (18,79%)
60%	17,01 (1,19%)	21,33 (8,22%)	28,56 (23,05%)
70%	17,05 (1,43%)	21,67 (9,94%)	29,6 (27,53%)
80%	17,1 (1,73%)	22,05 (11,87%)	30,69 (32,23%)
90%	17,16 (2,08%)	22,47 (14,00%)	31,85 (37,23%)
100%	17,22 (2,44%)	22,92 (16,29%)	33,08 (42,52%)

Os resultados obtidos mostram que a percentagem de **encastramento nas ligações vigas/tarugos** que melhor aproxima os resultados numéricos dos experimentais é também de **40%**. Também se conclui que, percentualmente, o grau de encastramento das ligações vigas/tarugos altera pouco a frequência do primeiro modo de vibração, e muito as frequências do terceiro modo de vibração.

Com estas considerações, foi então construída a simulação do modelo numérico do pavimento PVCP_1. As figuras 9.4.1 e 9.4.2 representam a planta estrutural do pavimento PVCP_1 e o modelo numérico correspondente.



Figura 9.4.1 - Planta estrutura do pavimento PVRCP_1

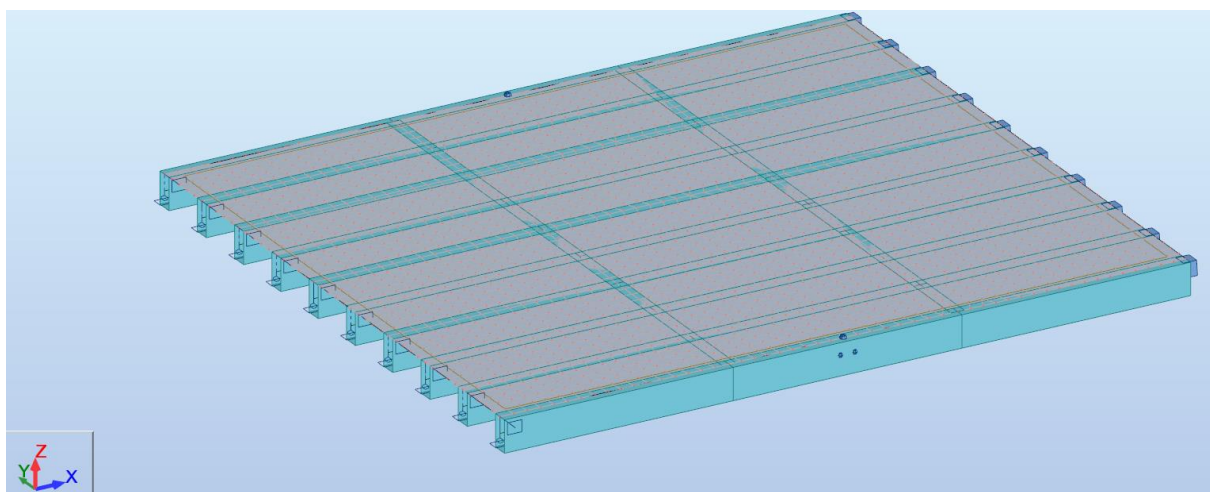


Figura 9.4.2 - Simulação numérica do pavimento PVCP_1

Para o pavimento PVCP_2 foram feitas as mesmas considerações relativamente aos apoios e às ligações vigas/tarugos do pavimento PVCP_1. Este pavimento difere do anterior no número de tarugos e no número de vigas.

Nas figuras 9.4.3 e 9.4.4 representa-se a planta estrutural do pavimento PVCP_2 e o modelo numérico correspondente.



Figura 9.4.3 - Planta estrutura do pavimento PVRCP_2

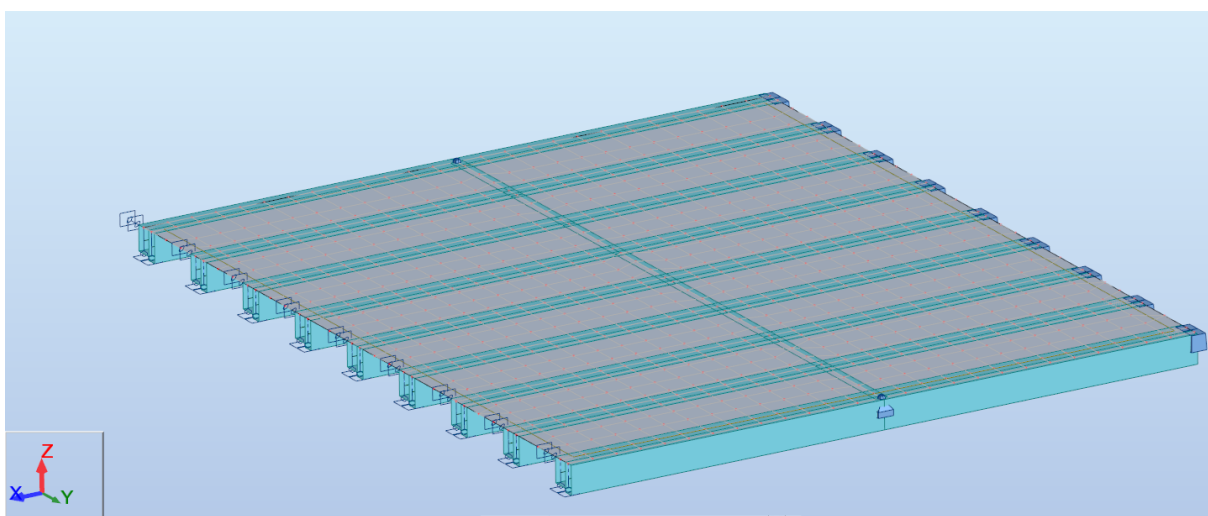


Figura 9.4.4 - simulação numérica do pavimento PVCP_2

Na tabela 9.4.3 estão indicados os valores das frequências dos três modos de vibração dos modelos numéricos PVRCP_1 e PVRCP_2.

Tabela 9.4.3 - Frequências de vibração dos modelos numéricos dos pavimentos do edifício da Praça Coronel Pacheco

Pavimentos	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
PVCP_1	16,93	20,71	26,66
PVCP_2	14,81	17,11	20,32

9.5. MODELO NUMÉRICO DOS PAVIMENTOS DO EDIFÍCIO DA RUA DO ROSÁRIO

Tendo em conta os pressupostos dos modelos numéricos construídos anteriormente, as simulações dos pavimentos selecionados do edifício da rua do Rosário foram efetuadas com as condições referidas na tabela 9.5.1.

Tabela 9.5.1 - Propriedades mecânicas e geométricas dos pavimentos do edifício da rua do Rosário

Pavimento		E (Gpa)	ρ (KN/m ³)	Base (cm)	Altura (cm)	Grau de encastrament o nos apoios (%)	Grau de encastrament o nos tarugos (%)
PVRR_1	Vigas	11,6	3,8	10	20	40	
	Soalho	9	3,4		3		
	Tarugo	11,6	3,8	10	12		40
	Teto	1	27		2		
PVRR_8	Vigas	10	6,7	18	18	40	
	Soalho	9	3,4		3		
	Teto	1	27		2		

Nas figuras 9.5.1 e 9.5.2 está representada a planta estrutural do pavimento PVRR_1 e o modelo numérico correspondente.

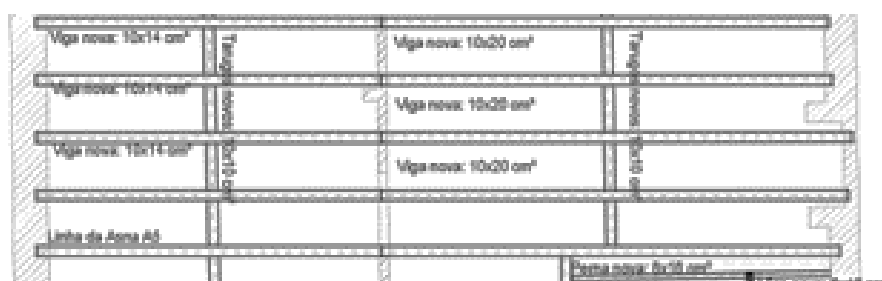


Figura 9.5.1 - Planta estrutural do pavimento PVRR_1

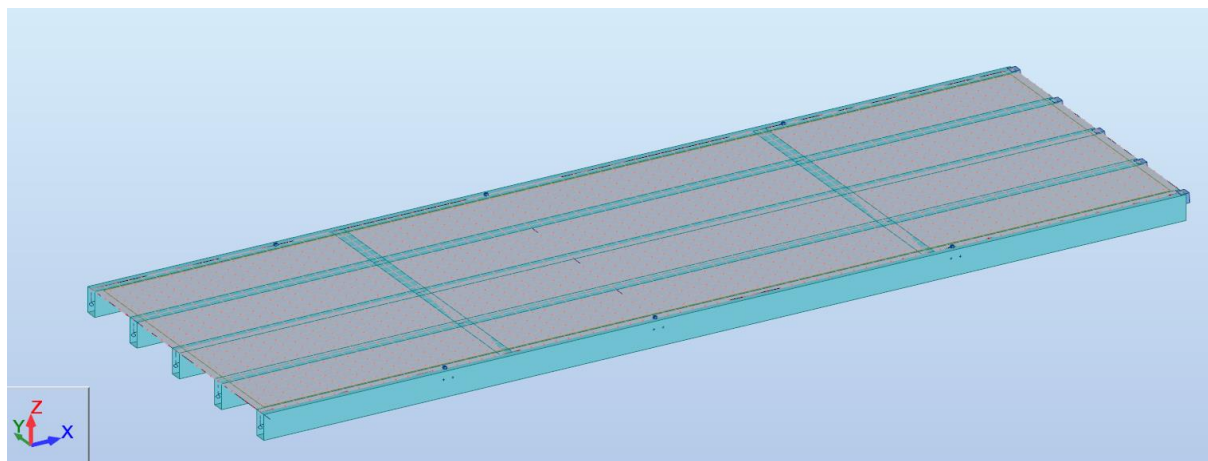


Figura 9.5.2 - simulação numérica do pavimento PVRR_1

Para o pavimento PVCP_2 foram assumidos os mesmos pressupostos dos pavimentos anteriores.

Quando se fizeram os ensaios dinâmicos neste pavimento, o que se observou em obra foi a existência de uma parede de tabique transversal ao pavimento posicionada sobre o pavimento, e que foi considerada na simulação numérica através de apoios simples verticais. Esta parede não estava especificada nas plantas estruturais, tendo sido identificada na figura 9.4.3 com uma linha azul.

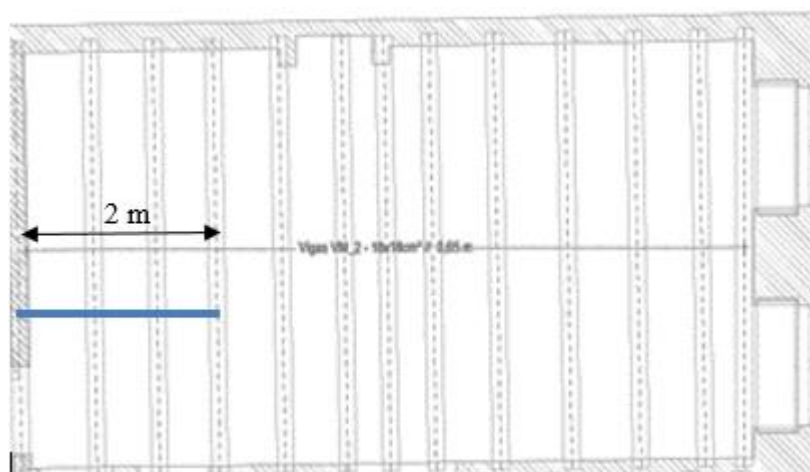


Figura 9.5.3 – Planta estrutural do pavimento PVRR_8

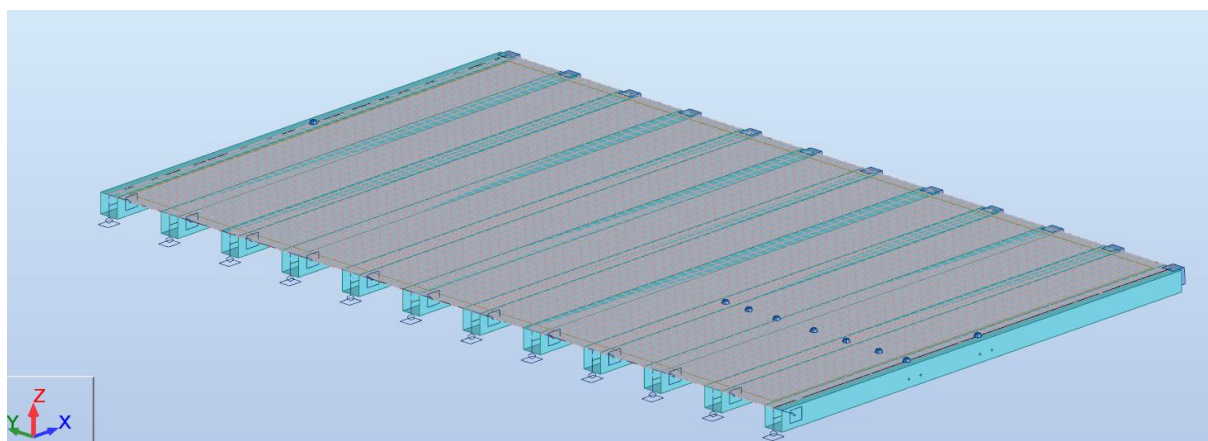


Figura 9.5.4 - simulação numérica do pavimento PVRR_8

Na tabela 9.5.2 estão indicados os valores das frequências dos três modos de vibração dos modelos numéricos PVRR_1 e PVRR_8.

Tabela 9.5.2 - Frequências de vibração dos modelos numéricos dos pavimentos do edifício da rua do Rosário

Pavimentos	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
PVRR_1	19,51	30,24	37,87
PVRR_8	14,10	17,00	20,42

9.6. MODELO NUMÉRICO DOS PAVIMENTOS DO EDIFÍCIO DA RUA DE CEDOFEITA.

De acordo com as propriedades geométricas, e mecânicas estabelecidas no capítulo 7 sobre o edifício da rua de Cedofeita, criaram-se modelos numérico para os pavimentos PVC_1 e PVC_3.

Ao contrário dos pavimentos já simulados, este era composto por duas placas de aglomerado de madeira OSB 3 sobrepostas em cima do vigamento, usando-se por isso um modelo de casca isotrópica para a simulação do revestimento. Os tipos de apoios dos vigamentos também eram diferentes dos observados nos pavimentos anteriores, aproximando-se mais a um apoio simples do que encastrado.

Na tabela 9.6.1 estão apresentadas as propriedades mecânicas consideradas no modelo de forma sintetizada.

Tabela 9.6.1 - Propriedades mecânicas e geométricas dos pavimentos do edifício da rua de Cedofeita

Pavimento		E (GPa)	ρ (KN/m ³)	Base (cm)	Altura (cm)	Grau de encastrament o nos apoios (%)	Grau de encastrament o dos tarugos (%)
PVC_1	Vigas	9	3,4	10	24	20	
	Tarugo	9	3,4	10	10		40
	OSB 3	7,5	6,3		4		
PVC_3	Vigas	9	3,4	8	22	20	
	Tarugo	9	3,4	10	10		40
	OSB 3	7,5	6,3		4		

Para a simulação numérica destes dois pavimentos, foram feitas as mesmas considerações dos pavimentos anteriores em relação ao grau de encastramento nas ligações vigas/tarugos e ao offset do soalho. Nas extremidades da casca isotrópica também foi considerado um apoio simples, restringindo-se nessa fronteira apenas a direção vertical (Z).

Relativamente ao grau de encastramento nos apoios, foi feita a mesma calibração que no modelo PVRA_5, na qual foram considerados diferentes graus de encastramento nos dois apoios. Neste caso, os valores que melhor aproximavam os resultados numéricos dos experimentais foram de 20% de grau de encastramento nos apoios.

As figuras 9.6.1 e 9.6.2 apresentam a planta estrutural do pavimento PRVC_1 e o modelo numérico respectivo.

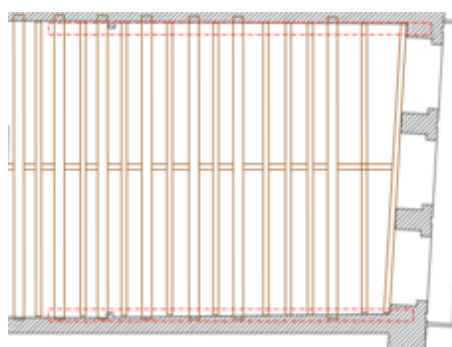


Figura 9.6.1 - planta estrutural do pavimento PVC_1

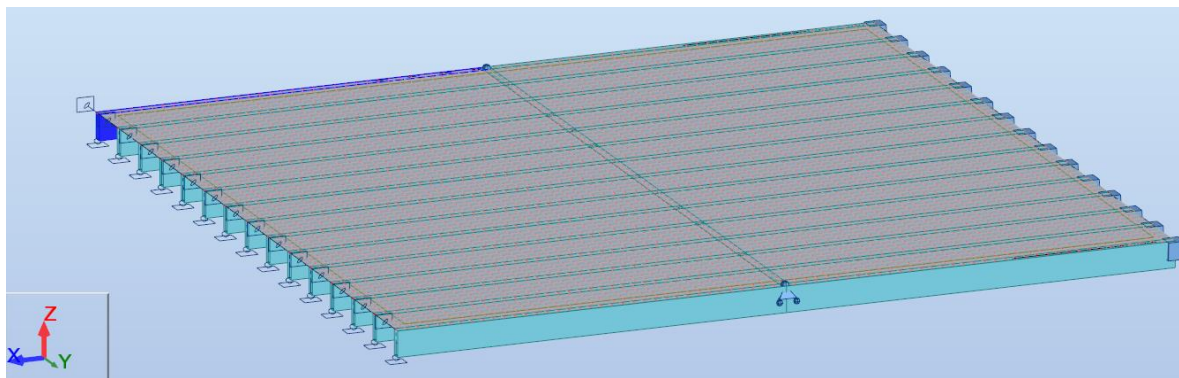


Figura 9.6.2 - Modelo numérico do pavimento PVC_1

O pavimento PVC_3 tem as mesmas propriedades físicas do PVC_1, mas apresenta vigas com secção transversal menor. Em contrapartida, PVC_3 apresenta inferiormente uma parede de alvenaria de pedra aproximadamente à 1,25m da parede de empena disposta na direção perpendicular às vigas.

As figuras 9.6.3 e 9.6.4 apresentam a planta estrutural do pavimento PVC_3 e o modelo numérico respectivo.

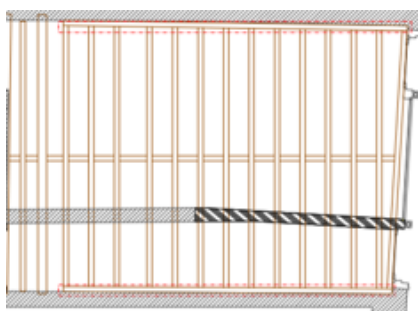


Figura 9.6.3 - planta estrutural do pavimento PVC_3

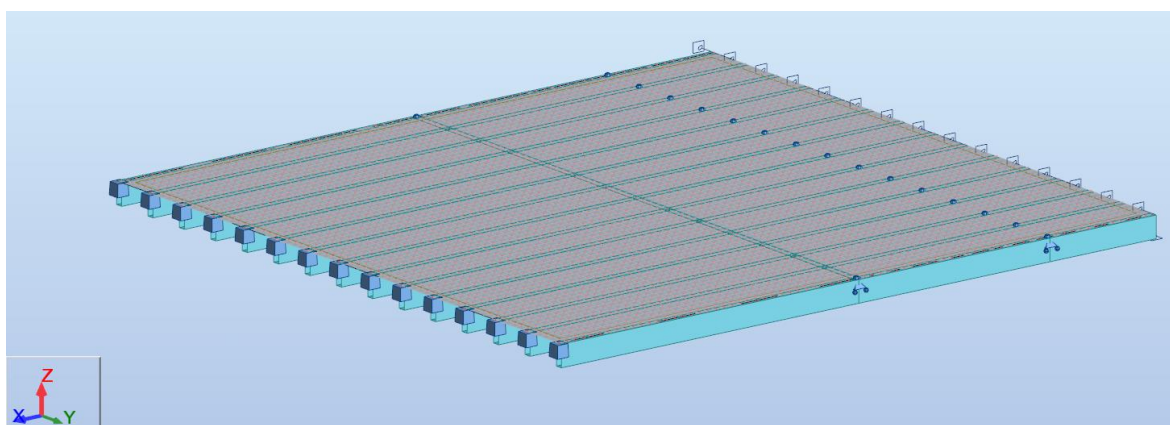


Figura 9.6.4 - Modelo numérico do pavimento PVC_3

Na tabela 9.6.2 estão indicados os valores das frequências dos três modos de vibração dos modelos numéricos PVC_1 e PVC_3.

Tabela 9.6.2 - Frequências de vibração dos modelos numéricos dos pavimentos do edifício da rua de Cedofeita

Pavimentos	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
PVC_1	12,58	15,09	20,32
PVC_3	20,72	22,97	27,33

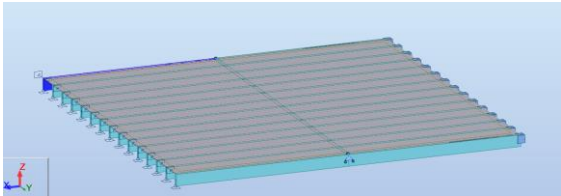
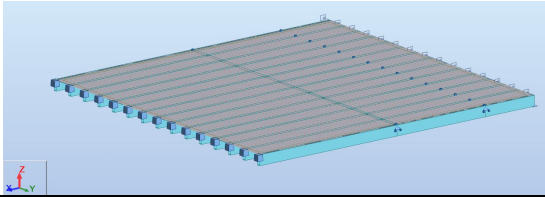
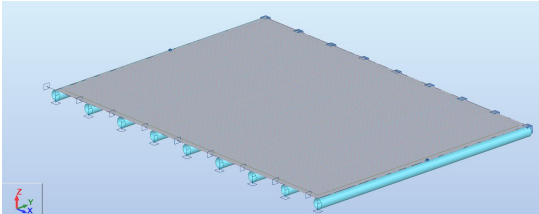
Como se observa nos resultados, o apoio da parede de alvenaria de pedra vai ter uma grande influência na vibração do pavimento, fazendo aumentar a frequência do 1º modo de vibração em quase 50%.

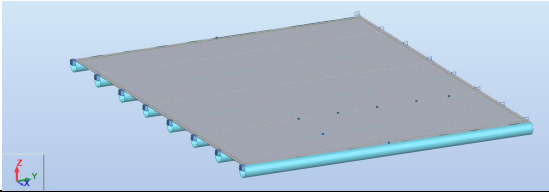
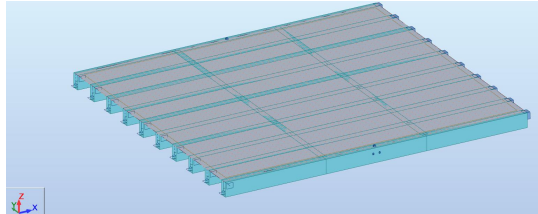
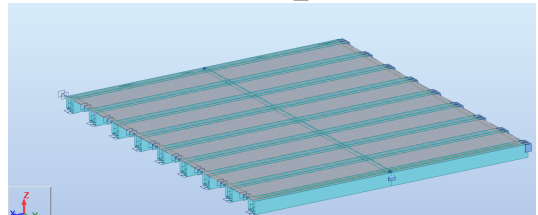
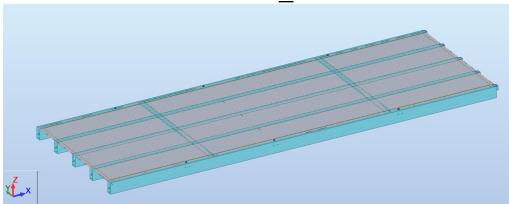
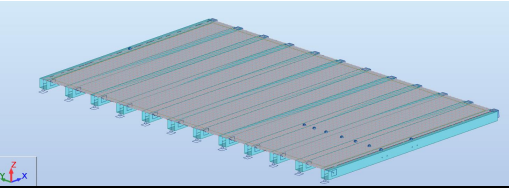
As considerações relativas à rigidez de encastramento nos apoios e nas ligações vigas/tarugos parecem corresponder às condições reais do pavimento no local, dado que as frequências de vibração experimentais são muito próximas das frequências obtidas a partir do modelo numérico.

9.7. ANÁLISE DE RESULTADOS DO COMPORTAMENTO DINÂMICO

Para melhor se entender a eficácia dos modelos numéricos criados para simular o comportamento dos pavimentos, foi elaborada a tabela 9.7.1 com os resultados das três frequências de vibração determinadas com o modelo numérico. A tabela inclui ainda a diferença percentual entre os dois valores. No anexo A2 apresentam-se as formas dos modos de vibração de todos os modelos numéricos.

Tabela 9.7.1 - Erro entre os modelos numérico e os ensaios dinâmicos

Pavimento		f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
PVC_1 	Resultado do ensaio	13,3	16	20
	Modelo numerico	12,58	15,09	20,32
	Diferença	-5,41%	-5,69%	1,60%
PVC_3 	Resultado do ensaio	21,85		25,8
	Modelo numerico	20,72	22,97	27,33
	Diferença	-5,17%	-	5,93%
PVRA_5 	Resultado do ensaio	12,3	14,16	16,8
	Modelo numerico	11,28	13,79	16,7
	Diferença	-8,29%	-2,61%	-0,60%

Pavimento		f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
PVRA_4 	Resultado do ensaio	12,30	21,25	25,5
	Modelo numerico	13,02	17,87	24,75
	Diferença	5,85%	-15,91%	-2,94%
PVCP_1 	Resultado do ensaio	15,14	-	26,4
	Modelo numerico	16,93	20,71	26,66
	Diferença	11,82%	-	0,98%
PVCP_2 	Resultado do ensaio	16,50	-	19,65
	Modelo numerico	14,81	17,11	20,32
	Diferença	-10,24%	-	3,41%
PVRR_1 	Resultado do ensaio	18,80	-	29,00
	Modelo numerico	19,51	30,24	37,87
	Diferença	3,78%	-	30,59%
PVRR_8 	Resultado do ensaio	15,87	-	23,70
	Modelo numerico	14,10	17,00	20,42
	Diferença	-11,15%	-	-13,84%

Salienta-se que, com todas as incertezas na avaliação das propriedades da madeira e da geometria das vigas, do soalho e dos tetos, os erros medidos entre as simulações numéricas e os ensaios experimentais são perfeitamente aceitáveis.

8.7.1. ESTUDOS PARAMÉTRICOS

De forma a se entender as diferenças registadas na tabela 9.7.1, vão ser realizados alguns estudos paramétrico relativamente às propriedades dos materiais utilizados, às condições de apoio, à influência do número de vigas e do número de tarugos inseridos nos pavimentos, das geometrias das secções e de algumas massas adicionais existentes nos pavimentos.

8.7.1.1. Influência das secções das vigas nas frequências de vibração

Um dos aspetos importantes a considerar na construção dos modelos numéricos é a determinação da real secção das vigas. Por exemplo, no pavimento PVRC_1 da rua de Cedofeita consideraram-se as dimensões indicadas nas plantas estruturais fornecidas pelo NCREP e que indicavam a existência de vigas com 22cm de diâmetro, quando na realidade as vigas no local apresentavam 24cm. Esta retificação das dimensões só foi possível em fase de obra depois de removido o pavimento.

De forma a perceber a sensibilidade dos resultados a pequenas variações das secções transversais das vigas, o pavimento PVRC_1 foi simulado supondo diâmetros para as vigas de 24, 22 e 20cm, e foram comparados os valores das frequências respectivas obtidas. É expectável que com a diminuição da secção a rigidez do pavimento diminua e, consequentemente, a sua frequência também diminua. Na tabela 9.7.2 apresentam-se os resultados das frequências para as diferentes secções transversais consideradas para as vigas.

Tabela 9.7.2 - Frequências de vibração do pavimento PVRC_1 para diferentes alturas das vigas

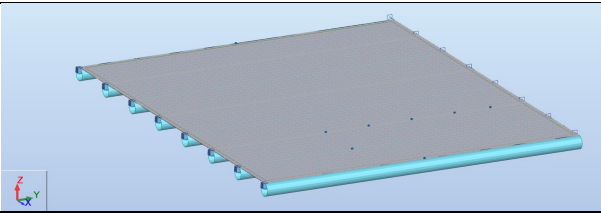
H (cm)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
20	10,32	13,00	18,81
22	11,44 (10,09%)	14,02 (7,85%)	19,52 (3,77%)
24	12,58 (21,90%)	15,09 (16,08%)	20,32 (8,03%)

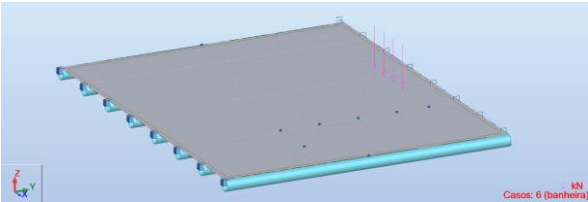
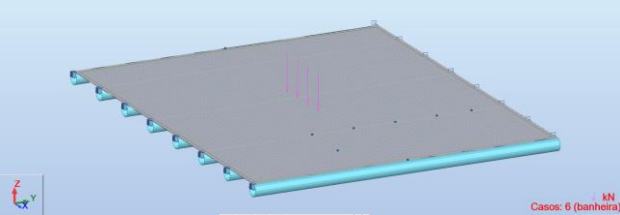
Verifica-se ser maior a diminuição percentual das frequências no primeiro modo de vibração do que nos restantes, mostrando que a secção do pavimento tem maior influência no primeiro modo de vibração do que nos modos de frequência superior. Em particular, no presente caso uma diminuição de 20% no diâmetro provocou uma diminuição de cerca de 22% na frequência do primeiro modo.

8.7.1.2. Influência de massas adicionais e do número de vigas nas frequências de vibração

Alguns pavimentos no momento da realização dos ensaios dinâmicos, têm objetos de grande massa poisados que interferem com as frequências de vibração. É o caso do pavimento PVR_4 da rua do Rosário onde no momento das medições das frequências existia uma banheira, aumentando assim a massa global da estrutura. Na tabela 9.7.3 permite analisar a influência desta massa adicional, considerada igual a 100kg, simulada através de quatro massas de 25kg espaçadas de 30cm, em 3 situações distintas: (i) pavimento sem massa adicional; (ii) massa no centro do pavimento e (iii) massa distanciada a 50cm da parede de empena. Na tabela 9.7.3 representam-se os modelos numéricos para estas 2 situações e as frequências obtidas.

Tabela 9.7.3 - Frequências de vibração do pavimento PVRA_4 para as 2 situações de massas adicionais

PVRA_4	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
	13,02	17,87	24,75

	12,85 (-1,30%)	17,53 (-1,93%)	24,06 (-2,78%)
	11,66 (-10,44%)	16,37 (-8,39%)	22,39 (9,53%)

Pode-se assim observar que a massa da banheira vazia tem pouca influência na frequência de vibração, quando encostada à parede de empena, mas quando colocada a meio vão as frequências de vibração sofrem uma redução de **10,44%**.

Analisou-se também a influência do número de vigas presentes num pavimento, nas frequências de vibração. Na tabela 9.6.3 comparam-se os resultados do pavimento PVA_5, tal como existe, com os de pavimentos idênticos com menor número de vigas, ou seja, mais estreitos, mas com igual espaçamento entre vigas.

Tabela 9.7.4 - Frequências de vibração do pavimento PVRA_5 para diferentes larguras, ou seja número de vigas

PVRA_5	Largura (m)	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
Pavimento com 9 vigas	6,00	11,28	13,79	16,70
Pavimento com 8 vigas	5,25	11,63 (3,10%)	14,58 (5,73%)	18,14 (8,62%)
Pavimento com 7 vigas	4,50	12,11 (7,36%)	15,68 (13,71%)	20,37 (21,98%)
Pavimento com 6 vigas	3,75	12,59 (11,61%)	17,25 (25,09%)	24,00 (43,71%)
Pavimento com 5 vigas	3,00	13,49 (19,59%)	20,26 (46,92%)	30,79 (84,37%)
Pavimento com 4 vigas	2,25	15,22 (34,93%)	26,76 (94,50%)	38,80 (132,34%)
Pavimento com 3 vigas	1,50	20,04 (77,66%)	41,47 (200,00%)	46,69 (179,58%)

Com a ajuda do gráfico da figura 9.7.1 conclui-se ser pequena a influência da largura dos pavimentos na frequência do primeiro modo de vibração, existindo um aumento mais expressivo nos modos de ordem mais elevada. Este resultado vem, mais uma vez, reforçar a ideia de que o soalho tem maior influência no segundo e terceiro modos de vibração e o vigamento no primeiro modo.

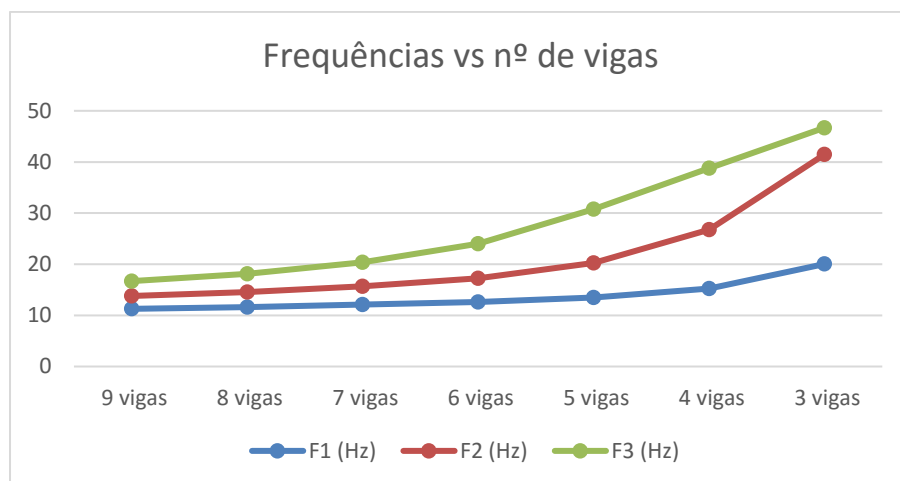


Figura 9.7.1 - Frequências vs. nº de vigas

8.7.1.3. Influência dos espaçamentos entre vigas e dos tarugos nas frequências de vibração

Tendo por base os pavimentos do edifício da praça Coronel Pacheco, são realizados dois estudos paramétricos relativos ao pavimento PVCP_1: (i) o primeiro em relação à influência dos tarugos nas frequências de vibração, sendo repetido o modelo numérico deste pavimento, mas considerando apenas um alinhamento de tarugos central, e (ii) o segundo à influência do espaçamento das vigas, para uma área de pavimento igual. Neste último caso, será construído um novo modelo numérico idêntico ao do pavimento PVCP_1, com a mesma largura, mas com espaçamentos entre vigas de 0,65m, perfazendo um total de 8 vigas, em vez das 10 vigas espaçadas de 0,50m existentes no pavimento real.

Na tabela 9.7.5 apresentam-se as frequências obtidas para o mesmo pavimento com um e dois alinhamentos de tarugos, e na tabela 9.7.6 as frequências para o mesmo pavimento com diferentes espaçamentos entre vigas.

Tabela 9.7.5 - Frequências de vibração do pavimento PVCP_1 para diferentes alinhamentos de tarugos

PVCP_1	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
2 alinhamentos de tarugos	16,93	20,71	26,66
1 alinhamento de tarugos	17,16 (1,35%)	20,49 (-1,06%)	25,17 (-5,58%)
Sem tarugos	17,31 (2,24%)	20,25 (2,22%)	23,65 (-11,29%)

Pode-se concluir que os tarugos têm pouca influência nas frequências de vibração, em particular nos primeiros modos. A redução da frequência do primeiro modo com o aumento do número de alinhamentos de tarugos mostra que, para este pavimento, os tarugos contribuem mais com massa do que com rigidez.

Tabela 9.7.6 - Frequências de vibração do pavimento PVCP_1 para diferentes espaçamentos entre vigas

PVRCP_1	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
Com 10 vigas	16,93	20,71	26,66
Com 8 vigas	14,13 (-16,50%)	17,86 (-13,76%)	24,21 (-9,19%)

Com a redução do número de vigas a frequência desce em todos os modos. A diminuição de rigidez é bastante mais importante do que a diminuição de massa provocada pela retirada das 2 vigas. No entanto, uma redução de 20% do número de vigas produz apenas uma redução de apenas 16,5%.

8.7.1.4. Influência da classe resistente das vigas nas frequências de vibração

Para se realizar um estudo relativo às propriedades mecânicas, nomeadamente entre as classes resistentes, foi construído um modelo numérico simplificado (figura 9.7.2) com três vigas simplesmente apoiadas e o soalho simulado pela mesma casca ortotrópica considerada nos pavimentos anteriores. Com o intuito de se perceber a importância de uma boa identificação da madeira presente nos pavimentos para uma boa modelação numérica, foram consideradas diferentes classes resistentes de madeira resinosa (C) e folhosa (D), e tentou-se perceber a influência que a alteração do módulo de elasticidade e do peso volúmico dentro de cada classe tem no comportamento dinâmico do pavimento.

A tabela 9.7.7 apresenta as frequências de vibração do modelo para as várias classes resistentes da madeira consideradas, bem como o seu módulo de elasticidade médio (**E**).

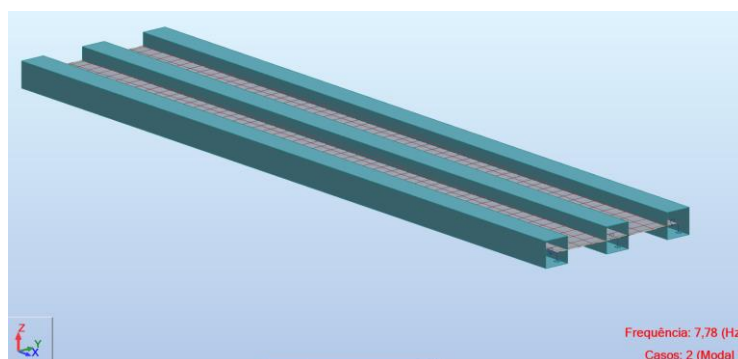


Figura 9.7.2 - Modelo numérico para o estudo da influência das classes resistentes da madeira

Tabela 9.7.7 - Frequência do primeiro modo de vibração para as várias classes resistentes da madeira

Classes resistentes resinosa	E (kN/mm ²)	Frequências	Classes resistentes folhosas	E (kN/mm ²)	Frequências
C14	7	7,88	D30	10	8,29
C16	8	8,33 (5,71%)	D35	10	8,31 (0,24%)
C18	9	8,79 (11,55%)	D40	11	8,50 (2,53%)
C20	9,5	8,99 (14,09%)	D50	14	9,23 (11,34%)
C22	10	9,14 (15,99%)	D60	17	10,06 (21,35%)
C24	11	9,54 (21,07%)	D70	20	10,13 (22,20%)

Classes resistentes resinosas	E (kN/mm ²)	Frequências	Classes resistentes folhosas	E (kN/mm ²)	Frequências
C27	11,5	9,62 (22,08%)			
C30	12	9,78 (24,11%)			
C35	13	10,09 (28,05%)			
C40	14	10,37 (31,60%)			
C45	15	10,64 (35,05%)			
C50	16	10,85 (37,69%)			

Constata-se que as classes de resistência, em particular as mais próximas entre si, não influenciam muito a frequência de vibração, ou seja se por exemplo houver um erro na classificação da classe resistente da madeira de C16 para C18, a diferença que vamos obter na frequência do pavimento relativa ao primeiro modo de vibração não é relevante, neste caso de apenas cerca de 5%.

8.7.1.5. Influência do grau de encastramento nos momentos fletores atuantes

Para analisar a influência do grau de encastramento nos momentos fletores atuantes, foi utilizado o pavimento PVRR_8 e sobre ele aplicada uma sobrecarga uniformemente distribuída de 2KN/m².

Na figura 9.7.3 está representado o pavimento PVRR_8 e identificados os alinhamentos dos apoios: (a), (c), e (e), e do meio vão entre apoios: (b) e (d). Estes alinhamentos servem para se fazer uma leitura mais simples da tabela 9.7.8. que relaciona os graus de encastramento com os respectivos momentos fletores.

Para se perceber melhor a distribuição dos momentos fletores nas vigas, representa-se na figura 9.7.4 o diagrama de momentos da viga VM3, para um grau de encastramento nos apoios de 40%.

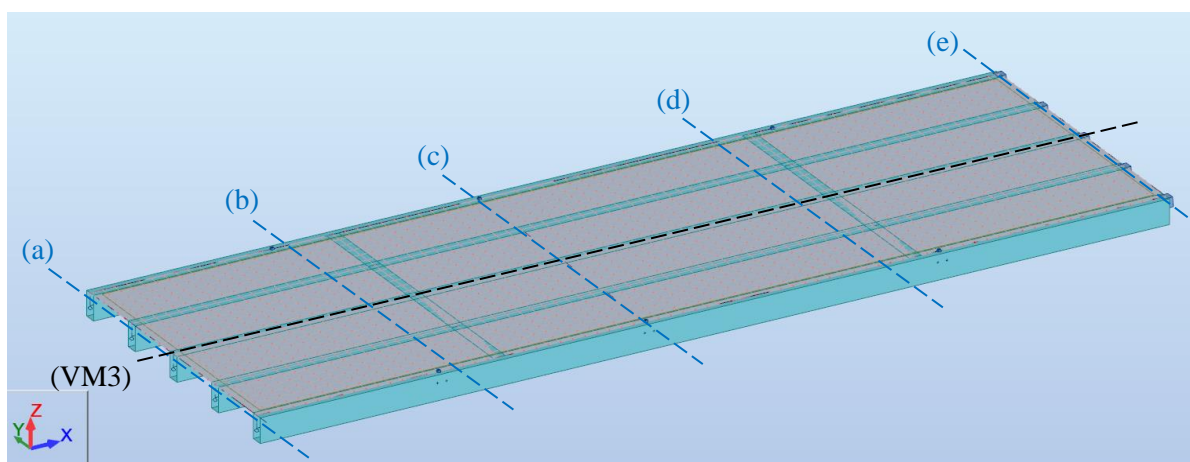


Figura 9.7.3 - Modelo numérico do pavimento PVRR_1

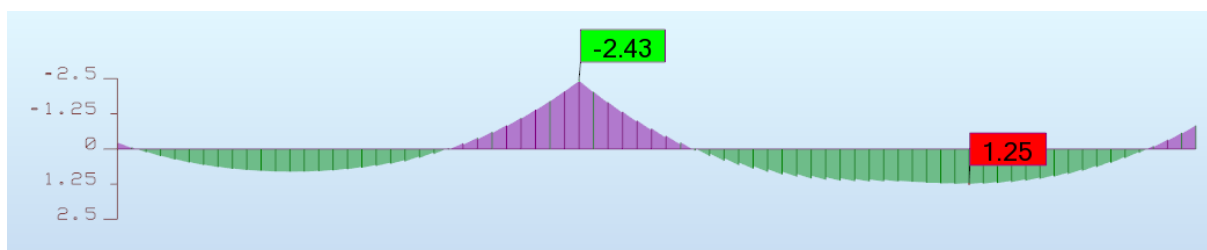


Figura 9.7.4 - Diagrama de momentos fletores da viga VM3 do pavimento PVRR_1

Tabela 9.7.8 - Comparação entre grau de encastramento nos apoios e momentos fletores na viga VM3 do pavimento PVRR_1

Grau de encastramento	Momento flector (KN.m)				
	Alinhamentos				
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
0%	-0,05	0,88	-2,53	1,35	-0,2
20%	-0,1	0,85	-2,49	1,3	-0,64
40%	-0,23	0,81	-2,43	1,25	-0,84
60%	-0,42	0,75	-2,34	1,17	-1,17
80%	-0,7	0,7	-2,2	1,09	-1,74
100%	-1,19	0,6	-1,91	0,98	-2,31

Como mostram os resultados, o grau de encastramento tem um efeito direto nos momentos fletores atuantes. O aumento do grau de encastramento impõe um aumento dos momentos fletores nos apoios, proporcionando uma redução dos momentos nas zonas centrais das vigas/pavimento, ou seja, uma maior homogeneidade na distribuição dos momentos fletores.

8.7.1.6. Considerações gerais

A partir de todos os estudos paramétricos realizados podem-se retirar algumas conclusões relativamente às diferenças entre os modelos numéricos e os ensaios de identificação dinâmica, referidos na tabela 9.7.1.

A primeira observação é relativa aos pavimentos PVRC_1 e PVRC_3, que são os que apresentam menor desvio entre as frequências numéricas e experimentais. Terá contribuído para isso o fato das propriedades dos materiais dos pavimentos e as dimensões das vigas terem sido obtidos com exatidão no local durante a obra.

O pavimento PVRA_5 apresenta um diferencial entre a frequência numérica do primeiro modo e a experimental de -8.29%, indiciando que o pavimento pode estar mal caracterizado ao nível das secções das vigas (défice na altura do vigamento), já que os estudos paramétricos mostram que as vigas são o componente do pavimento que mais interfere com o primeiro modo de vibração.

Nos pavimentos PVRR_8 e PVRR_1 existe um diferencial mais expressivo no terceiro modo de vibração, indiciando que o soalho pode não corresponder exatamente ao considerado no modelo numérico, nomeadamente pode corresponder a uma espessura superior a 3cm.

10.

ESTUDOS GERAIS

Neste capítulo é feita uma análise conjunta dos resultados de todos os ensaios de identificação dinâmica efetuados no âmbito desta dissertação, nomeadamente nos edifícios da rua de Cedofeita, rua do Rosário, ruas do Almada e Aires Gouveia, praça Coronel Pacheco e rua de Cedofeita 1. Estes edifícios permitiram ainda complementar a base de dados de ensaios dinâmicos efetuada pelo NCREP e da qual fazem parte outros edifícios, nomeadamente os edifícios da rua do Rosário 1, rua da Torrinhã, rua de Santa Helena, instituto Araújo Porto, Cordoaria, rua Barão de S. Cosme, rua da Torrinhã 1, rua das Fontainhas, rua do Rosário 2 e rua de Monte dos Judeus.

Foram assim registadas as frequências fundamentais dos pavimentos e as secções, o espaçamento e o vão das vigas, analisando-se um total de 90 pavimentos de madeira.

Nem todos os pavimentos se encontravam, à data dos ensaios, nas mesmas condições; os edifícios da rua de Cedofeita, ruas do Rosário e Aires Gouveia, rua do Almada, praça Coronel Pacheco, rua de Cedofeita 1, rua do Rosário 1, rua da Torrinhã, instituto Araújo Porto e Cordoaria apresentavam o soalho e o teto; os edifícios da rua da Torrinhã 1, rua das Fontainhas e rua de Monte dos Judeus, apresentavam o teto, mas não o soalho; os edifícios da rua Barão de S. Cosme, rua do Rosário 2 e rua de Monte dos Judeus só tinham as vigas, e o edifício da rua Santa Helena apenas tinha o soalho e as vigas.

Na Tabela 10.1 indicam-se os valores das frequências fundamentais de vibração dos pavimentos e outras características geométricas que os definem, nomeadamente a geometria e espaçamento das vigas. A sigla D representa o diâmetro das vigas e B e H a largura e altura das vigas, no caso de vigas roladas e retangulares, respectivamente. Na coluna relativa aos pavimentos, indicam-se as referências usadas nos capítulos anteriores, às quais se juntam os pavimentos ensaiados pelo NCREP. Na coluna relativa aos ensaios dinâmicos, estão também as referências usadas nos capítulos anterior, nas quais se juntam, outras referências usadas pelo NCREP.

Tabela 10.1 - Resultados dos ensaios dinâmicos

Rua	Pavimentos	Ensaio	B ou D (cm)	H (cm)	Vão (m)	Espaçamentos (m)	f (Hz)
Rua de Cedofeita	PVC_1	EDC_1	10	24	5,25	0,5	13,3
	PVC_2	EDC_3	10	24	5,25	0,5	13,3
	PVC_3	EDC_5	8	22	4,00	0,5	21,85
	PVC_4	EDC_7	8	22	4,00	0,5	20

Rua	Pavimentos	Ensaio	B ou D (cm)	H (cm)	Vão (m)	Espaçamentos (m)	f (Hz)
Rua do Almada	PVRA_1	EDRA_1	18		4,35	1	11
	PVRA_2	EDRA_3	18		4,35	0,75	14,77
	PVRA_3	EDRA_5	18		4,35	0,75	12,2
	PVRA_4	EDRA_7	18		4,35	0,75	12,3
	PVRA_5	EDRA_9	18		4,35	0,75	12,3
	PVRA_6	EDRA_11	16		4,35	0,75	17
	PVRA_7	EDRA_13	16		4,35	0,75	12,5
Rua do Rosário	PVRR_1	EDRR_1	10	20	4,30	0,6	18,8
	PVRR_2	EDRR_3	10	20	4,30	0,6	13,5
	PVRR_3	EDRR_5	10+18	20+18	4,50	0,67	13,7
	PVRR_4	EDRR_7	18	18	2,80	0,65	26
	PVRR_5	EDRR_9	10+18	20+18	4,50	0,7	12
	PVRR_6	EDRR_11	18	18	4,5	0,7	13,9
	PVRR_7	EDRR_13	18	18	2,8	0,7	20,9
	PVRR_8	EDRR_15	18	18	4,5	0,65	15,5
	PVRR_9	EDRR_17	18	18	2,8	0,65	19,8
	PVRR_10	EDRR_19	18	18	4,5	0,65	13,32
	PVRR_11	EDRR_21	18	18	2,8	0,65	22,46
Praça Coronel Pacheco	PVCp_1	EDCP_1	12	24	5,2	0,5	15,14
	PVCP_2	EDCP_3	8+14	23+20	5,2	0,73	17,6
	PVCP_3	EDCP_5	8+14	22+20	5,2	0,65	16
	PVCP_4	EDCP_7	8+14	20+20	5,2	0,73	14,89
	PVCP_5	EDCP_9	8	21	5,2	0,65	16,5
	PVCP_6	EDCP_11	8+14	20+20	5,2	0,63	10,7
	PVCP_7	EDCP_13			3,3		21,24
Rua Aires Gouveia	PVRAG_1	EDAG1	11		3,18	0,75	17,09
	PVRAG_2	EDAG2	16		4,35	0,73	18,07
	PVRAG_3	EDAG3	16		3,59	0,73	20,23
Rua de Cedofeita 1	PVRC1_1	EDRC1_1	17		2,35	0,75	23,8
	PVRC1_2	EDRC1_2	17		5	0,8	20,14
Rosário 1	PVRR1_1	ED1			4,5	0,65	13,9
	PVRR1_2	ED2			4,5	0,65	13,9
	PVRR1_3	ED3			2,65	0,65	25,9
	PVRR1_4	ED4			4,5	0,65	15,9
	PVRR1_5	ED5			4,5	0,65	12,7
	PVRR1_6	ED6			2,65	0,65	17,8
	PVRR1_7	ED7			2,65	0,65	20,5
	PVRR1_8	ED8			4,5	0,65	11,2

Rua	Pavimentos	Ensaio	B ou D (cm)	H (cm)	Vão (m)	Espaçamentos (m)	f (Hz)
Sta. Helena	PVRSH_1	1ªandar			4,3	0,6	16,6
	PVRSH_2	1ªandar			4,3	0,6	16,6
	PVRSH_3	R/C			4,3	0,65	21,5
	PVRSH_4	R/C			4,3	0,65	20,5
	PVRSH_5	R/C			4,3	0,6	21,5
	PVRSH_6	R/C			4,3	0,6	22,5
Torrinha	PVRT_1	ED1			3		15,1
	PVRT_2	ED2			3		17,8
	PVRT_3	ED3			4		22,5
	PVRT_4	ED4			4,2		8,8
	PVRT_5	ED5			4,2		9
	PVRT_6	ED6			2,8		21,2
	PVRT_7	ED7			1,1		21,7
Instituto Araújo Porto	PVIA_1	ED1			4,8		13,7
	PVIA_2	ED2			4,8		13,7
	PVIA_3	ED3			4,8		13,7
	PVIA_4	ED4			4,8		13,7
	PVIA_5	ED5			4,8		13,7
	PVIA_6	ED6			4,8		9,8
	PVIA_7	ED7			4,8		9,8
	PVIA_8	ED8			4,8		9,8
	PVIA_9	ED9			4,8		9,8
Cordoaria	PVCO_1	piso 1			3,8		14,65
	PVCO_2	piso2			5		10,74
	PVCO_3	piso 3			5		10,75
	PVCO_4	piso 4			5		12,7
	PVCO_5	piso 5			5		16,6
Barão de São Cosme	PVRBC_1	V1	19		3,65		19
		V2	20		3,65		17
		V3	20		3,65		19,3
Torrinha 1	PVRT1_1	VN3	12		4,3	0,5	9,3
		V5	19		4,3	0,5	9,3
		V4	15		4,3	0,5	9,3
		VN2	12		4,3	0,5	9,3
		V2	19		4,3	0,5	9,3
		VN1	12		4,3	0,5	9,3
Fontainhas	PVRF_1	ED1	17		5	0,5	10,7
	PVRF_2	ED2	17		5	0,5	10,7

Rua	pavimentos	Ensaio	B ou D (cm)	H (cm)	Vão (m)	Espaço (m)	f (Hz)
Rosário 2	PVRR2_1	V11	19		2,8	0,7	21
		V12	5		2,8	0,7	21
		V13	20		2,8	0,7	21
	PVRR2_2	V21	20		2,8	0,65	35
		V22	15		2,8	0,65	37
		V23	19		2,8	0,65	28
Monte dos Judeus	PVMJ_1	V3	12		4,26	0,55	24,9
		V4	12		4,26	0,55	24,9
		V5	12		4,26	0,55	24,4

Nota: A designação 10+18 ou 8+14 em “B” refere-se à existência de duas vigas com secções diferentes interpostas lado a lado, neste caso uma com 10cm de base e outra com 18cm de base. O mesmo sucede em “H”.

A partir da tabela 10.1 foram produzidos gráficos onde foram verificadas possíveis correlações lineares entre os diferentes dados, e supondo os pavimentos agrupados em 2 conjuntos: um com pavimentos compostos por vigas, soalho e teto, e outro com pavimentos sem soalho e teto; visto que nos pavimentos que só têm soalho, ou só teto, não se conseguiram obter correlações plausíveis.

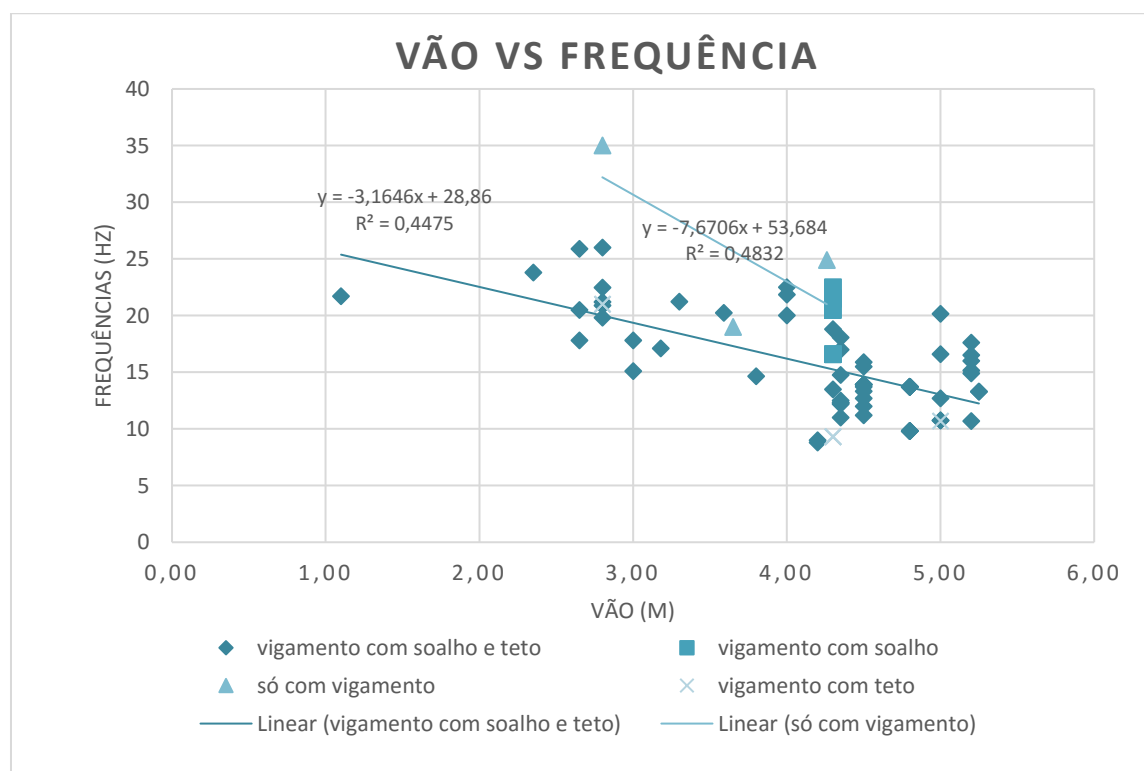


Figura 10.1 - Correlação entre a frequência de vibração do primeiro modo e o vão

A partir do gráfico da figura 10.1 constata-se existir uma tendência para a redução da frequência com o aumento do vão, ainda que com correlações (R^2) de apenas 0,475 e 0,483 para os dois conjuntos de pavimentos, respectivamente. Outra constatação é a tendência de pavimentos compostos apenas pelas vigas e tarugos apresentarem frequências mais altas do que pavimentos com tetos e(ou) soalhos, ou seja os soalhos e os tetos, não só homogenizam o comportamento do pavimento, como contribuem de forma importante para a massa dos pavimentos.

A modo de se perceber a influência da inércia das vigas nos resultados das frequências de vibração dos pavimentos, foi construído o gráfico da figura 10.2. Para este gráfico foram selecionados todos os pavimentos com vigamento, soalho e teto, e com vãos idênticos, visto que o vão vai influenciar muito os valores da frequência de vibração. Foi feita assim uma análise para os pavimentos com vão de vigas de 4,0 a 4,5m e outra para vãos de 5,0 a 5,5m.

A primeira constatação é a tendência para o aumento da frequência quando a inércia das vigas diminui, para os pavimentos com vão de 4,0 a 4,5m, o que parece contraditório, já que a inércia leva a um aumento de rigidez. Já nos pavimentos com vão de 5,0 a 5,5m, a tendência é inversa. A explicação para este fenômeno pode ser encontrada no gráfico da figura 10.3, onde é feita uma correlação entre a inércia das vigas e o espaçamento, e onde se pode concluir que os pavimentos ensaiados com um vão de 4,0 a 4,5m sofrem um aumento de espaçamento quando a inércia das vigas aumenta, podendo haver uma desproporcionalidade entre a inércia e o espaçamento, havendo um aumento significativo do espaçamento para um pequeno acréscimo da inércia, que leva a que a rigidez global do vigamento diminua. Já o vigamento com o vão de 5,0 a 5,5m não há grandes variações de inércia, independentemente dos espaçamentos entre vigas.

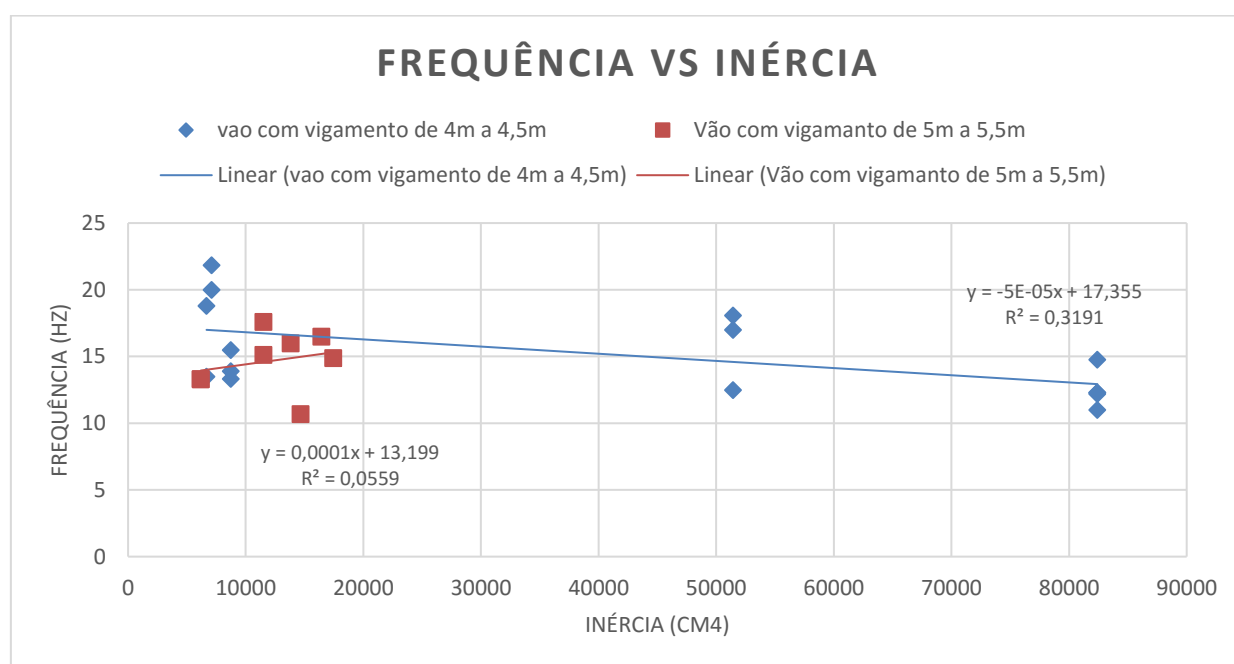


Figura 10.2 - Correlação entre frequência e a inércias das vigas

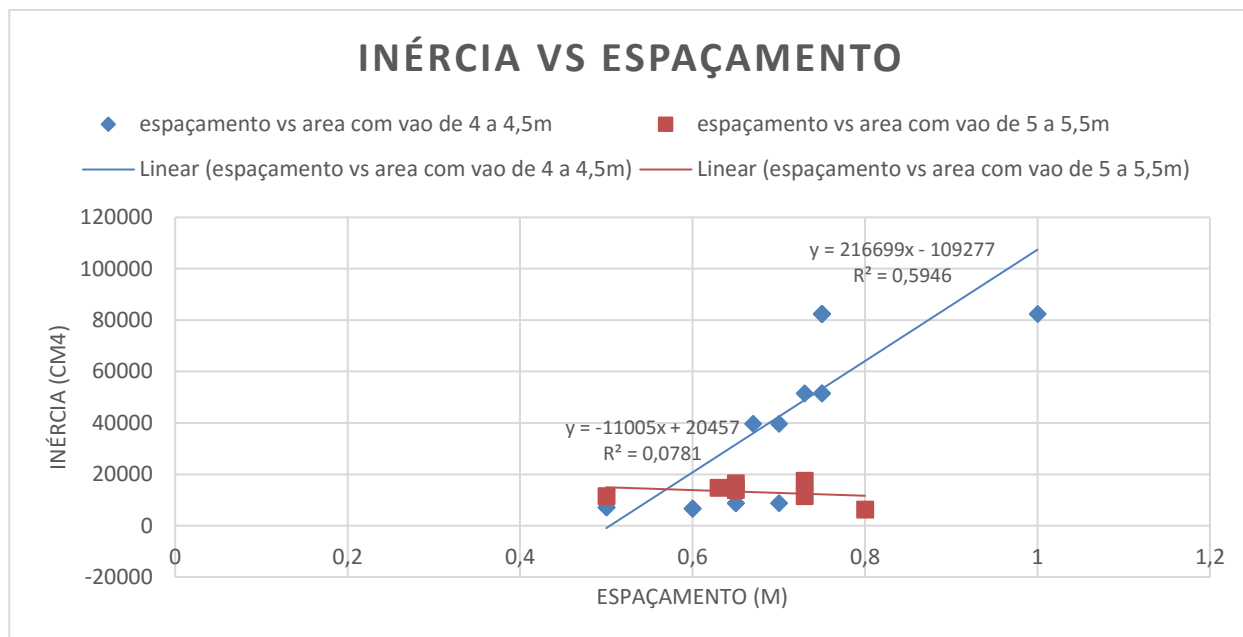


Figura 10.3 - Correlação entre a inércia e o espaçamento entre vigas

11.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

11.1. CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu observar o comportamento mecânico e a eficácia dos modelos numéricos na caracterização dos pavimentos de madeira antigos.

Em primeiro lugar, podemos concluir que para os pavimentos de madeira antigos os ensaios de identificação dinâmica são uma boa metodologia para caracterizar os apoios das vigas e as ligações vigas/tarugos. Contudo, é sempre importante o suporte de outros ensaios, como por exemplo um resistógrafo, para caracterizar o estado da madeira.

Com estes ensaios verificamos que, para os pavimentos de madeira antigos, os apoios das vigas nas paredes e as ligações vigas/tarugos, pode considerar-se 40% da rigidez de encastramento. Estes valores foram considerados em todos os pavimentos de madeira antigos, tendo-se obtido bons resultados, sendo, portanto, valores a considerar para futuras simulações numéricas deste tipo de pavimentos.

Durante a execução desta dissertação, houve dificuldade em determinar a geometria exata dos vigamentos, isto porque em alguns casos os vigamentos não têm um diâmetro constante ao longo das vigas, e/ou as dimensões das secções não estão em conformidade com as plantas estruturais, podendo uma diferença de 2cm na altura da secção, fazer variar a frequência de vibração em 10% e, consequentemente, influenciar as considerações feitas nos apoios.

Relativamente aos modos de vibração nos pavimentos de madeira, chegou-se à conclusão que os elementos que mais influenciam o primeiro modo de vibração são as vigas, e o segundo e terceiro modo de vibração são mais fortemente influenciados pelos tarugos e pelo soalho. Assim, no momento de calibrar o modelo, as vigas e os apoios são prioritariamente calibrados pelo primeiro modo de vibração, e as ligações tarugos/vigas e o soalho pelo segundo e terceiro modos de vibração.

Constatou-se também que os tetos dos pavimentos não têm resistência de suporte, atuando no pavimento como uma massa adicional, o que leva à diminuição das frequências de vibração. Esta massa acaba por ser um valor estimado, já que em tetos antigos podem existir espessuras diferentes.

Apesar de todas as incertezas que temos no estudo dos pavimentos de madeira, comparando os valores de frequência dos modelos numéricos, com os valores de frequências de vibração dos ensaios dinâmicos, podemos concluir que com as simulações numéricas realizadas obtemos valores aceitáveis, com uma diferença de aproximadamente 10%.

11.2. SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS.

A maior dificuldade na criação dos modelos numérico, foi estimar o grau de encastramento dos apoios das vigas nas paredes de alvenaria de pedra, e das ligações vigas/tarugos. Assim era aconselhável a criação de um pavimento de madeira em laboratório, no qual as propriedades mecânicas fossem muito bem caracterizadas, de modo a que a única incerteza fossem o grau de encastramento dos apoios e das ligações vigas/tarugos. Como se pensa que o grau de encastramento esteja relacionado com o comprimento de penetração na parede de alvenaria, seria interessante perceber tanto é que o comprimento de penetração das vigas nas paredes influenciava o grau de encastramento. Depois para o mesmo pavimento eram inseridos tarugos, para calibrar o grau de encastramento nas ligações vigas/tarugos.

Visto que as correlações entre os vários elementos dos pavimentos não foram muito conclusivas, seria aconselhado a realização de mais ensaios de avaliação de frequências de vibração de pavimentos de madeira, para melhor esclarecer a influência dos tetos e dos soalhos na rigidez dos pavimentos. Estes estudos devem ser feitos acompanhados de relatórios de inspeção e diagnóstico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

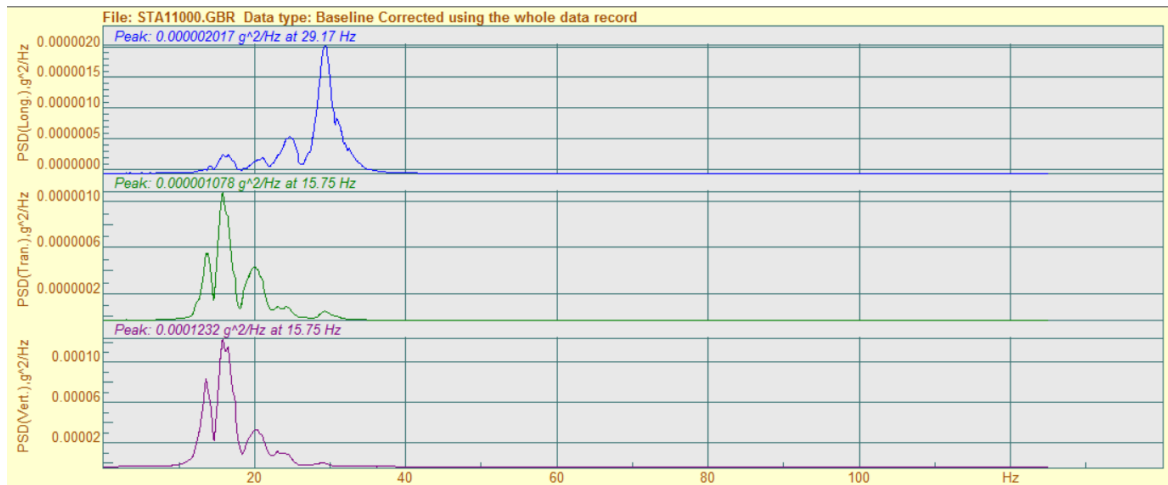
- [1] Carvalho, A., Madeiras Portuguesas – Vol. I. Instituto Florestal, Lisboa, 1996
- [2] Arriaga, F. Pezaza, F; Esteban, M.; Bobadilla, I; Garcia, F., Intervención en estructuras de madera. AITIM, Madrid, 2002.
- [3] Correia, E. Análise e Dimensionamento de Estruturas de Madeira. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009.
- [4] Carlos Szücs, Prof. Rodrigo Terezo, Ângela do Valle, Poliana Moraes. ESTRUTURAS DE MADEIRA.2015.
https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/1313798/mod_resource/content/0/Apostilamadeiras2015-1.pdf. Acedido em abril de 2016.
- [5] Ilharco, T., Guedes, J., Costa, A., Paupério, E., Arêde, A.. Análise de pavimentos de madeira através de ensaios in situ. O caso dos edifícios antigos do Porto. FEUP, U. Aveiro. Porto
- [6] Ilharco, T. Paviementos de Madeira em Edifícios Antigos; Diagnostico e Entrevenção Estrutural . Dissertação de Mestrado, FEUP, 2007.
- [7] Joaquim Teixeira. Descrição Do Sistema Construtivo Da Casa Burguesa Do Porto Entre Os Séculos XVII e XIX . Provas De Aptidão Pedagógica E Capacidade Científica, 2004.
- [8] Jose Santos. Sustentabilidade nos materiais e na construção.2011.
<http://docplayer.com.br/9882936Sustentabilidade-nos-materiais-e-na-construcao.html>. 28/04/2016
- [9] Gemma R., Alfonso B., Milagros C., Luis A. I Jornada da Investigacion en Construcccion. Actas de la jornada (Editor A., ed.), Data de realização, Local de realização, páginas, Editora, Cidade de publicação.
- [10] João Appleton. A Sustentabilidade nos projetos de Reabilitação de Edifícios. 2011.
http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/jappleton8831143814ddf7a812e105.pdf. 20/03/2016
- [11] EN 338, Structural Timber. CEN, Bruxelas, 2003.
- [12] http://www.smartply.com/images/uploads/product_downloads/SmartPly_OSB3_Datasheet_2012_1.pdf. Acedido em Maio de 2016
- [13] ENV 1995-1-1:2004, Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, Comité Europeu de Normalização (CEN).
- [14] Vibrações em pavimentos, recomendações técnicas. 2007. http://www.stb.rwth-aachen.de/projekte/2007/HIVOSS/docs/Guideline_Floors_PT01.pdf . Acedido em Maio de 2016.
- [15] EN 408, Timber Structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties CEN, Bruxelas, 2003.
- [16] ICOMOS, Recomendações para a análise, conservação e restauro do património arquitetónico.
- [17] Coutinho, J. Materiais de construção, Madeiras, 1999
- [18] NCREP, Projeto de Estabilidade – Licenciamento, ref. MD/NCREP_0140ª1013, Novembro 2013, Porto

- [19] NCREP, Relatório de Inspeção e Diagnostico Estrutural, ref. RID | NCREP_0385A0315, Maio de 2015
- [20] NCREP, Relatório de Inspeção e Diagnostico Estrutural, ref. RID | NCREP_0129A0613, Outubro de 2013
- [21] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Sism%C3%B3grafo> , Acedido em junho de 2016
- [22] Coelho, J. Avaliação das características mecânicas de pavimentos de madeira antigos utilizando identificação dinâmica. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2015.

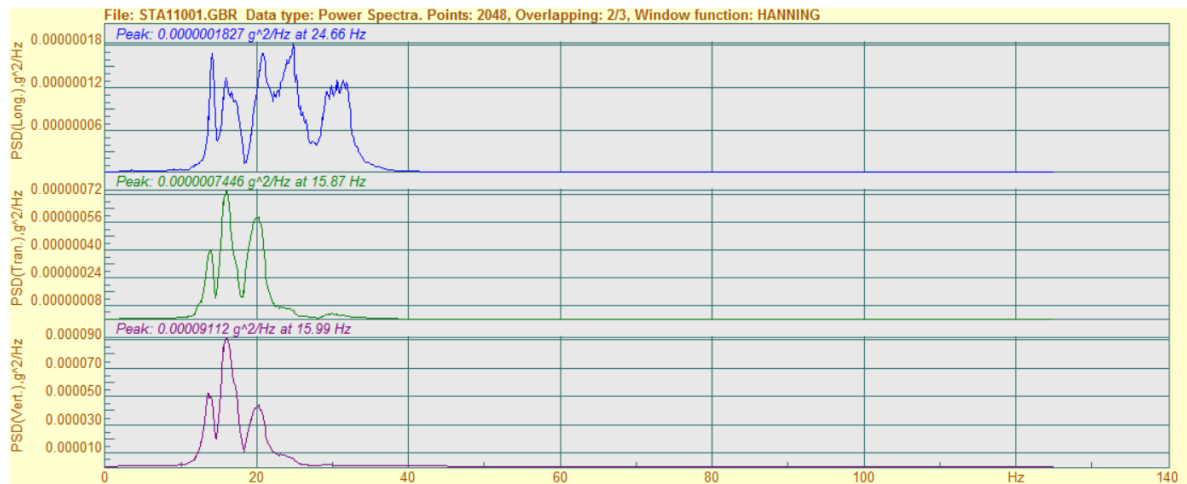
ANEXO A

Ensaio dinâmico

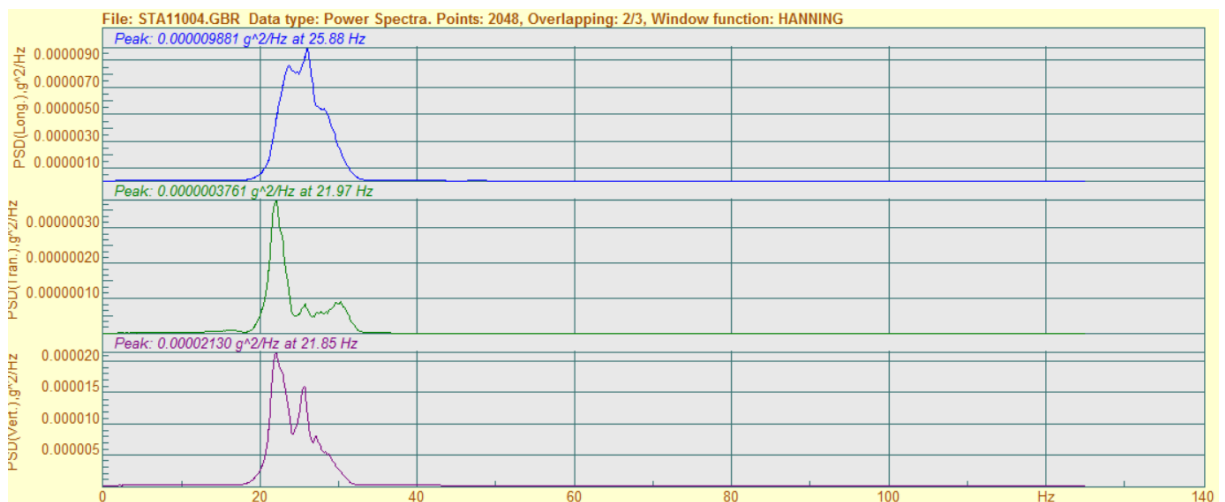
EDC_1



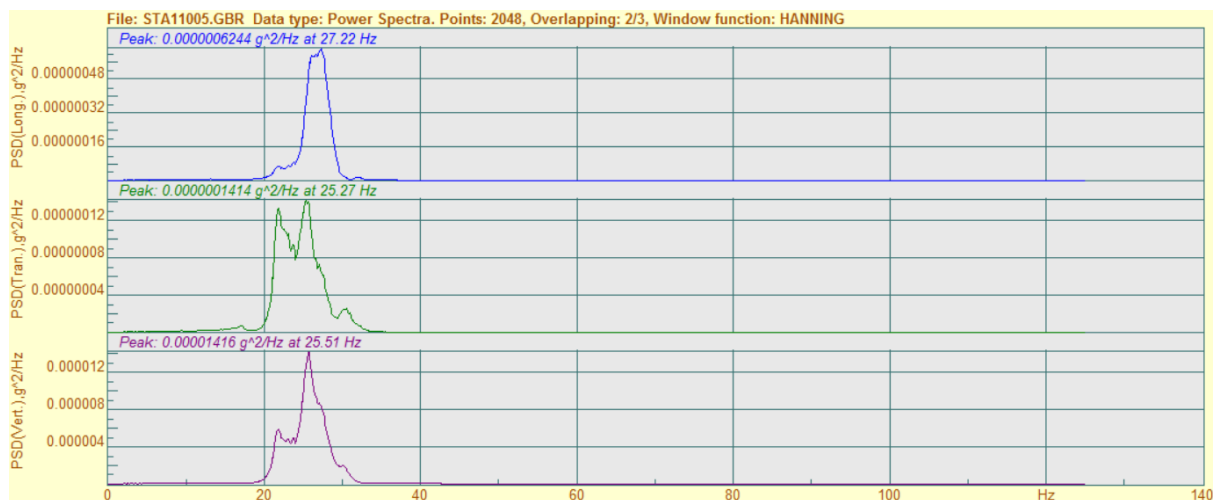
EDC_2



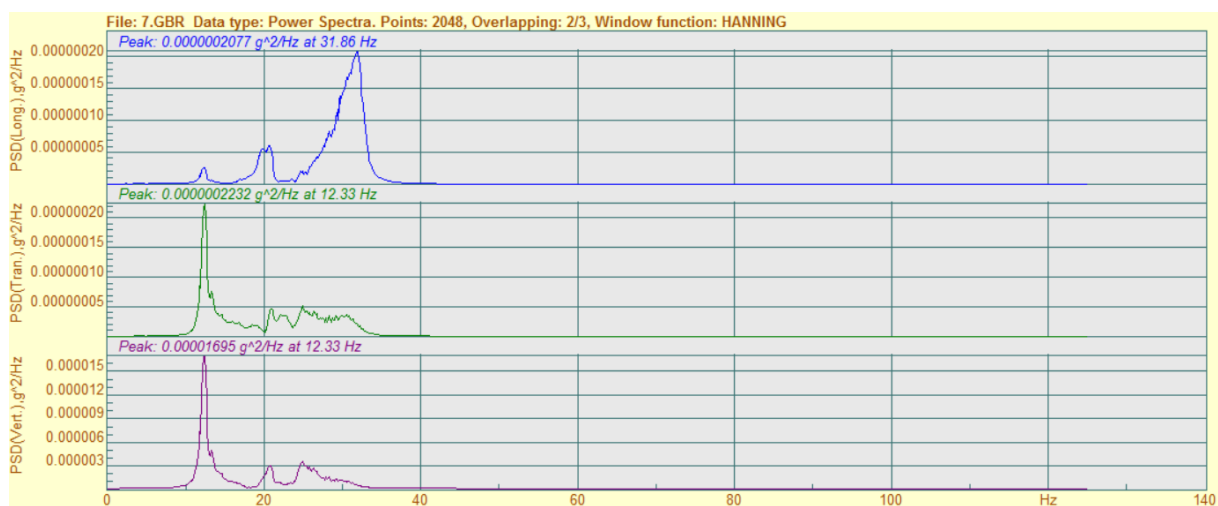
EDC_5



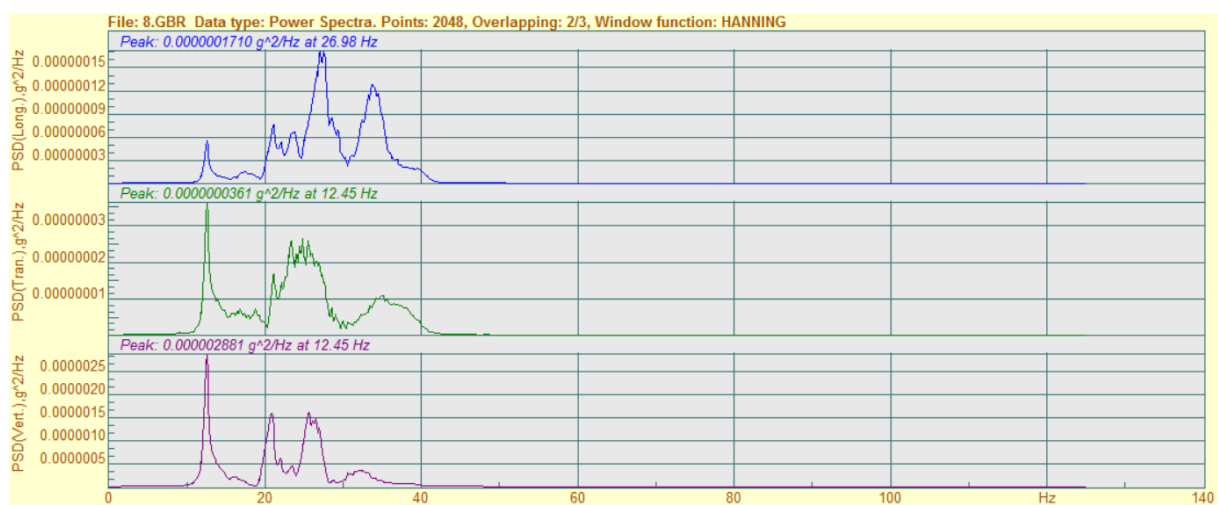
EDC_6



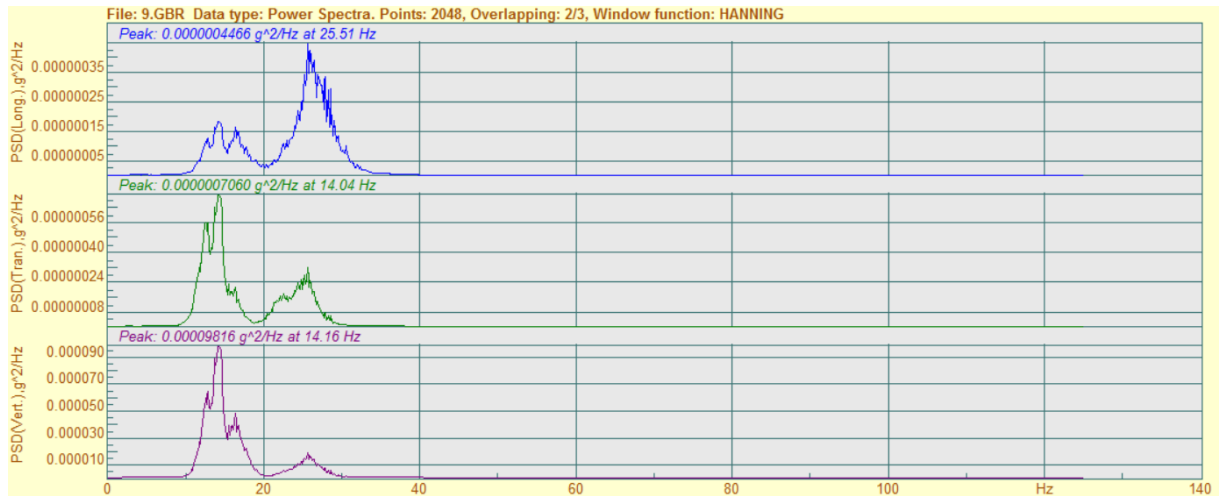
EDRA_7



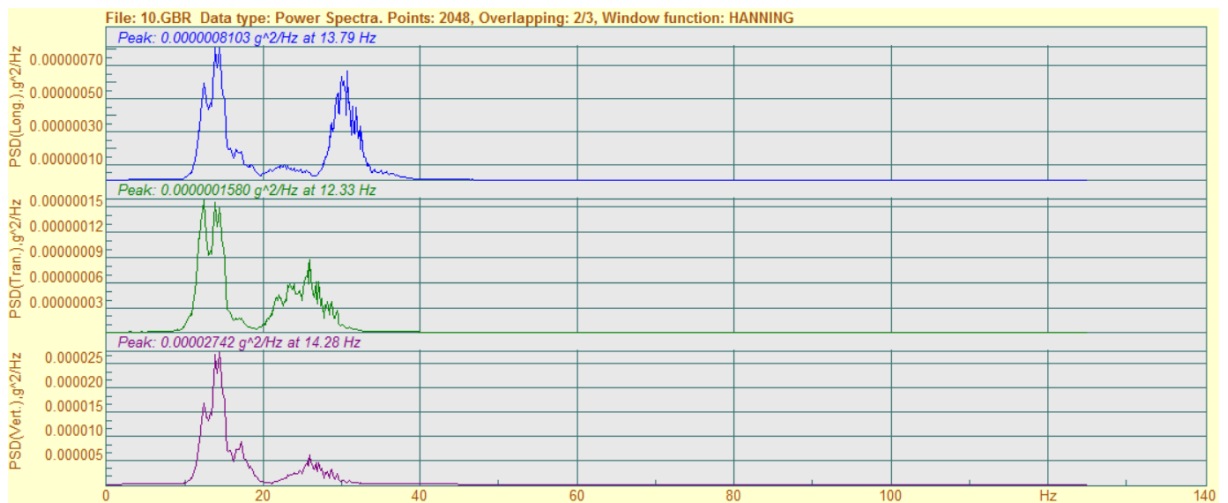
EDRA_8



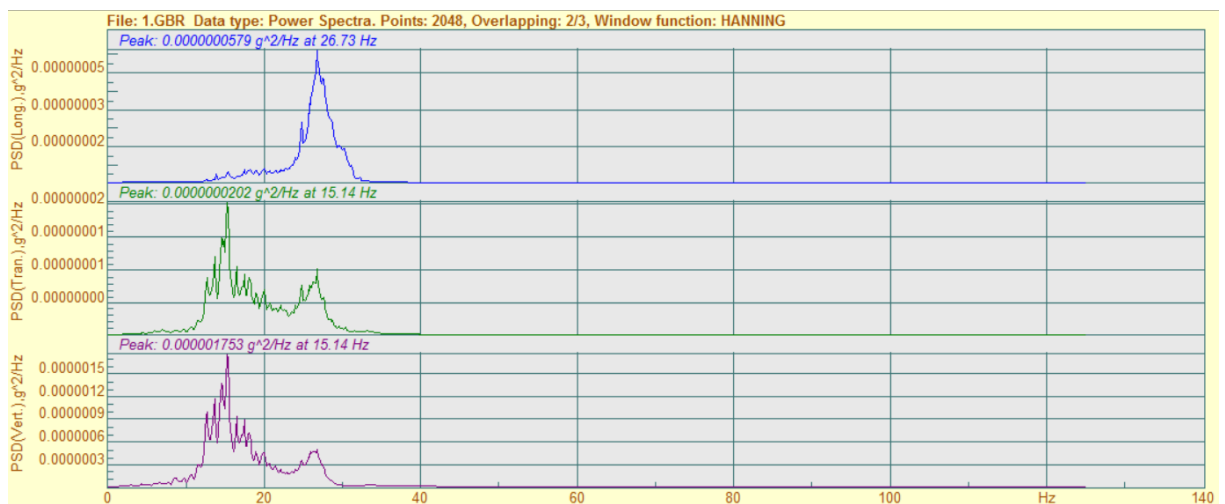
EDRA_9



EDRA_10



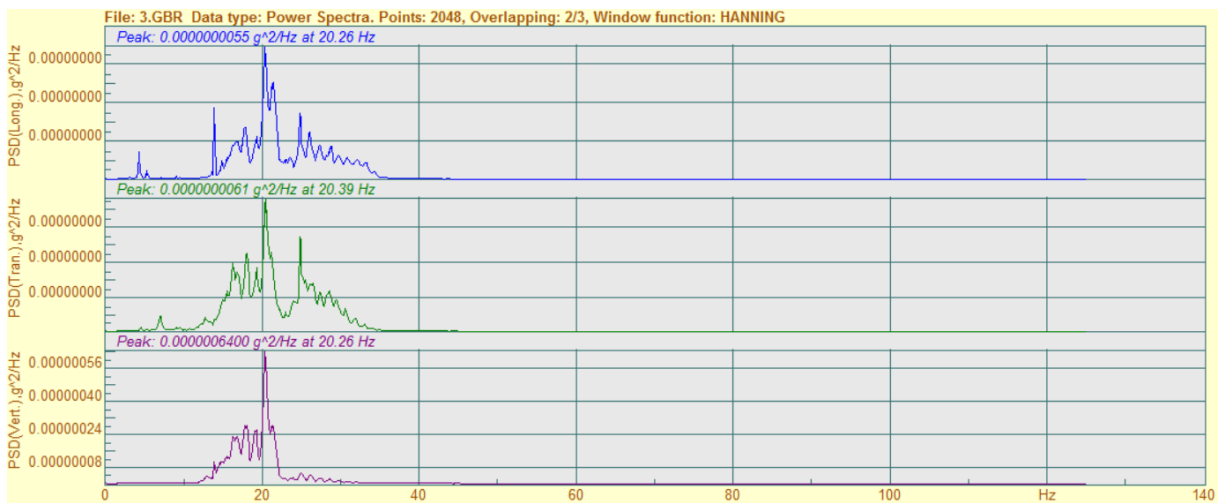
EDCP_1



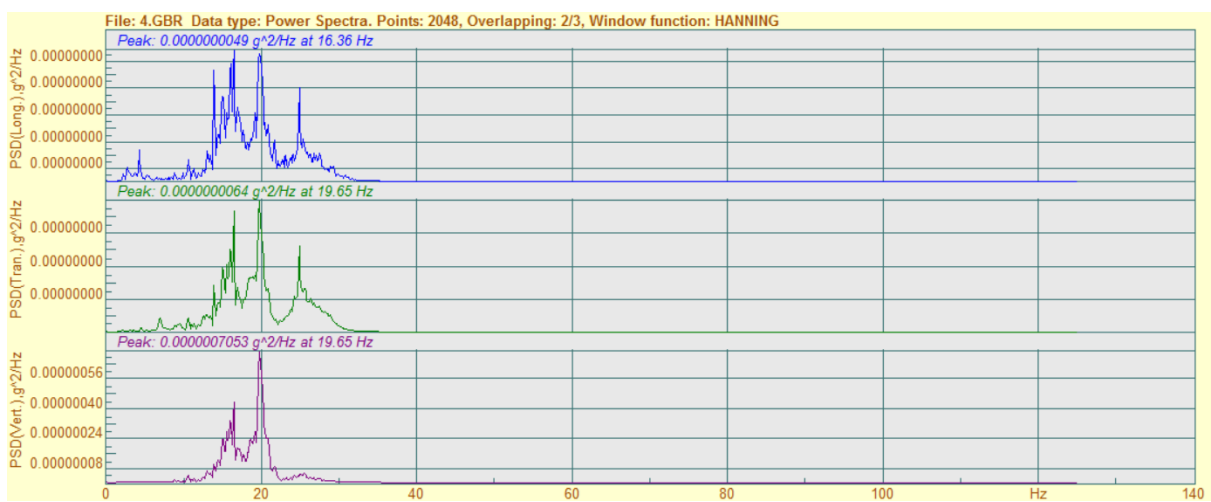
EDCP_2



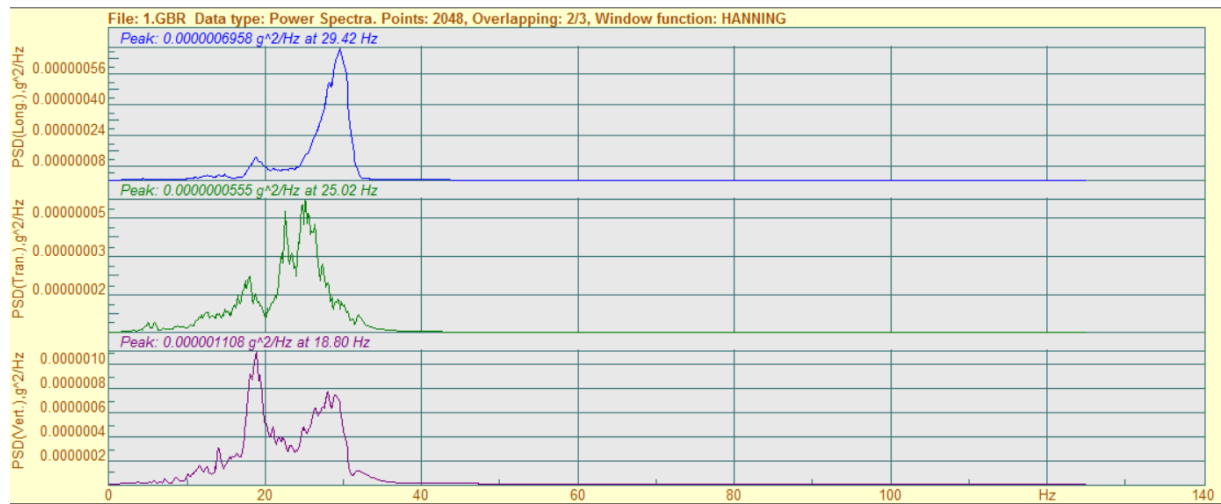
EDCP_3



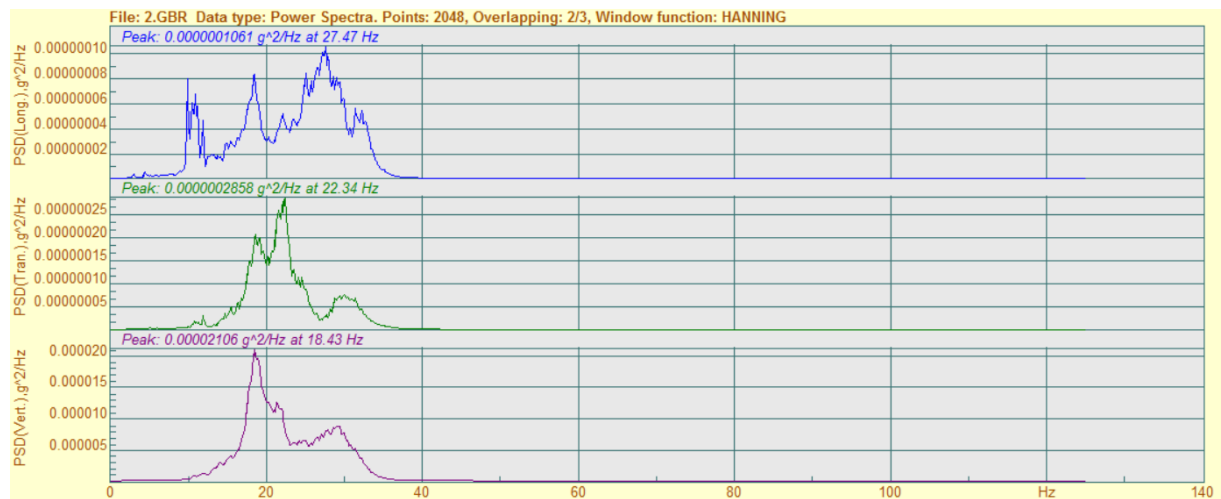
EDCP_4



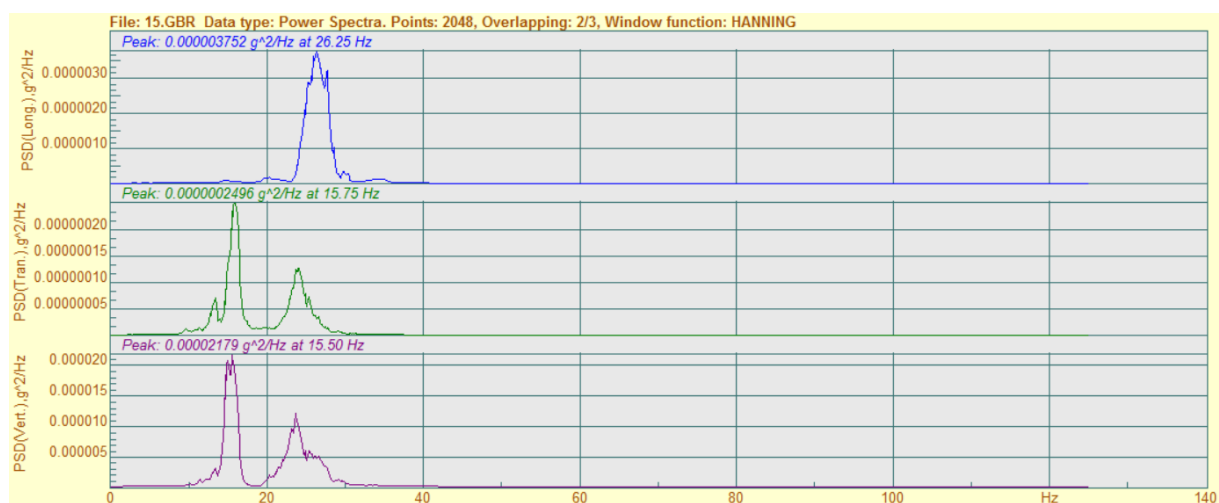
EDRR_1



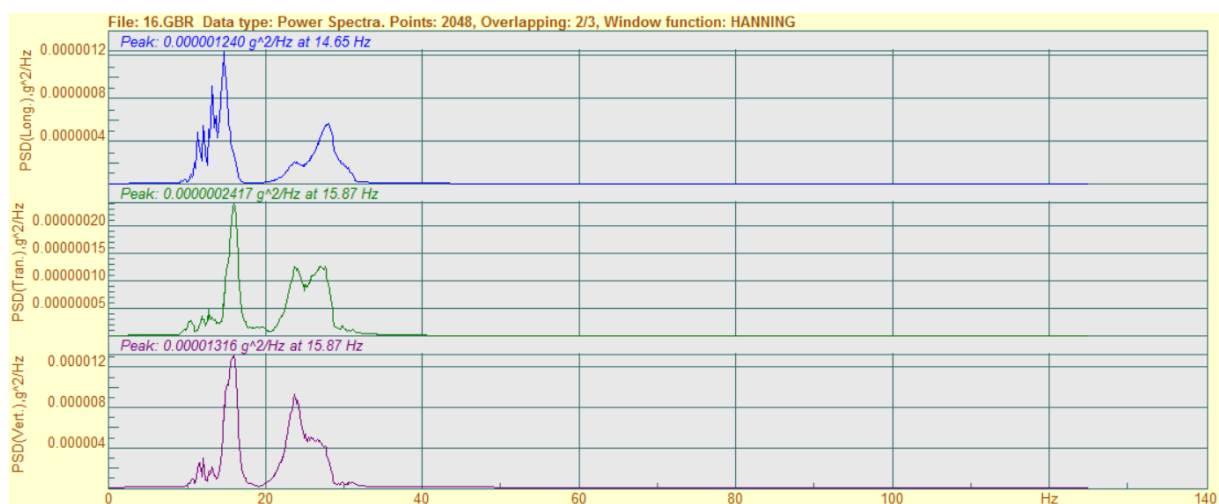
EDRR_2



EDRR_15



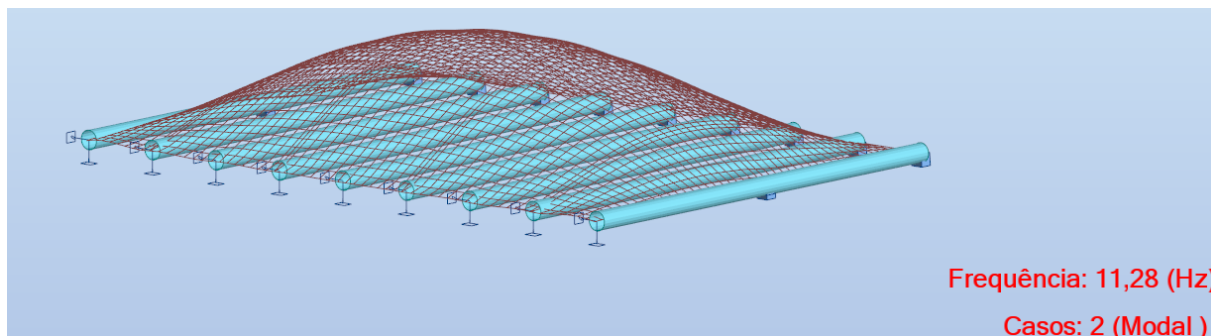
EDRR_16



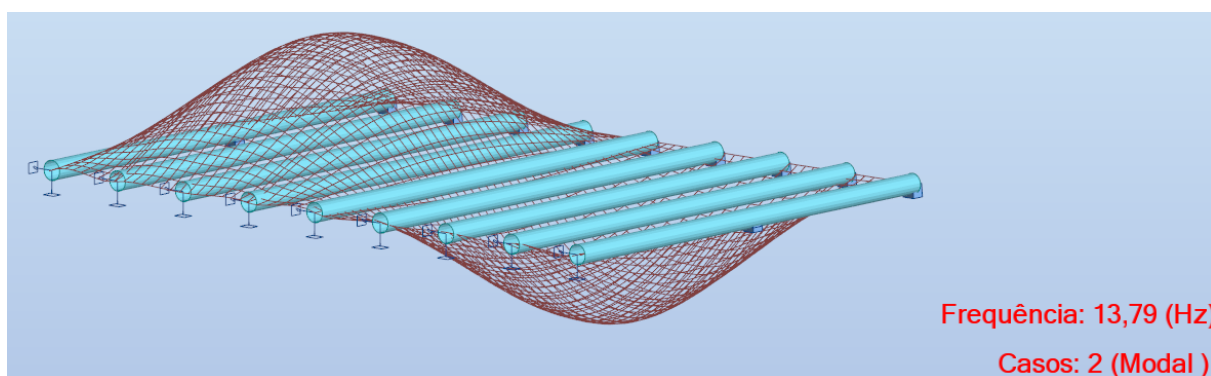
ANEXO A2

Frequências de vibração

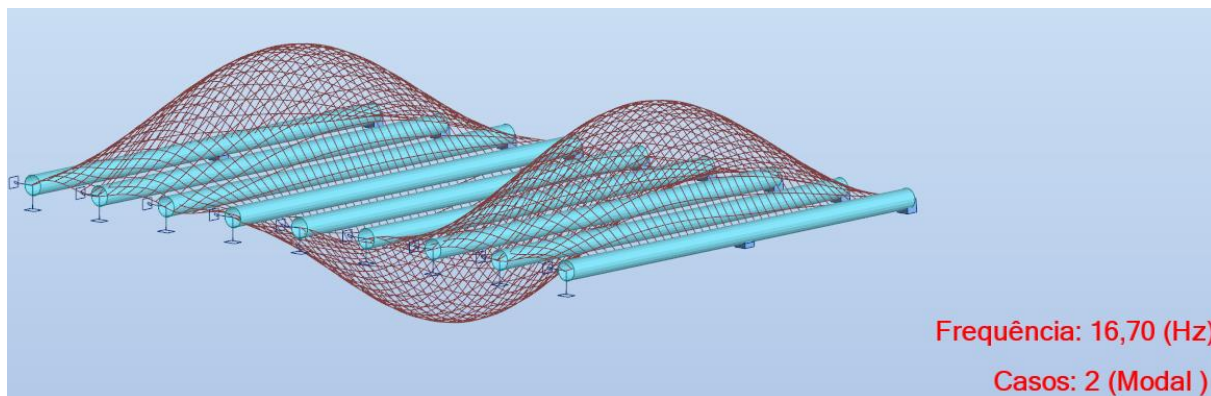
1º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRA_5



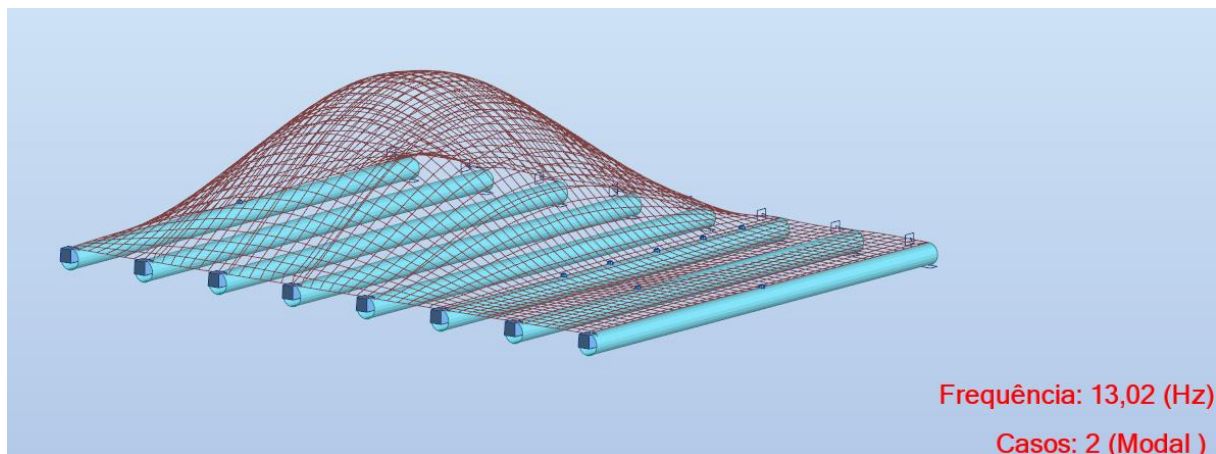
2º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRA_5



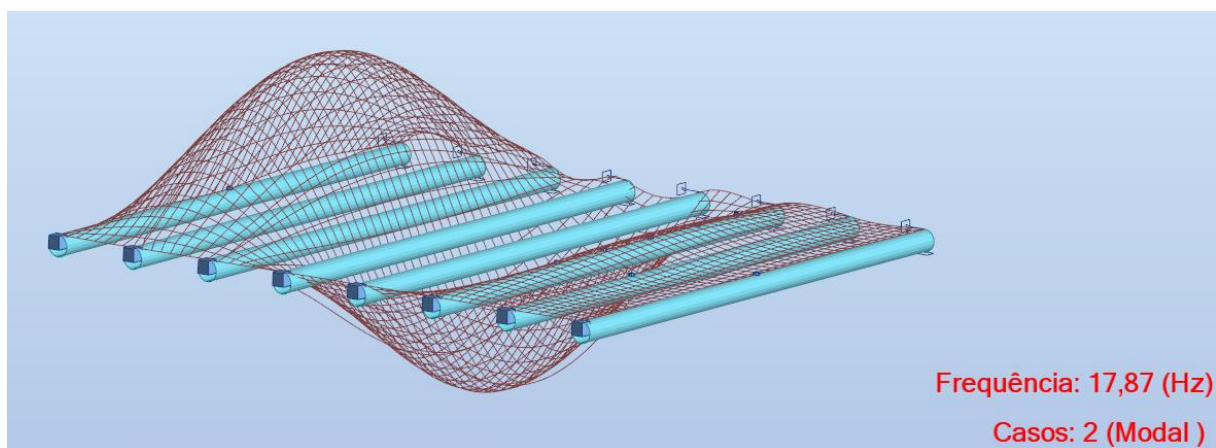
3º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRA_5



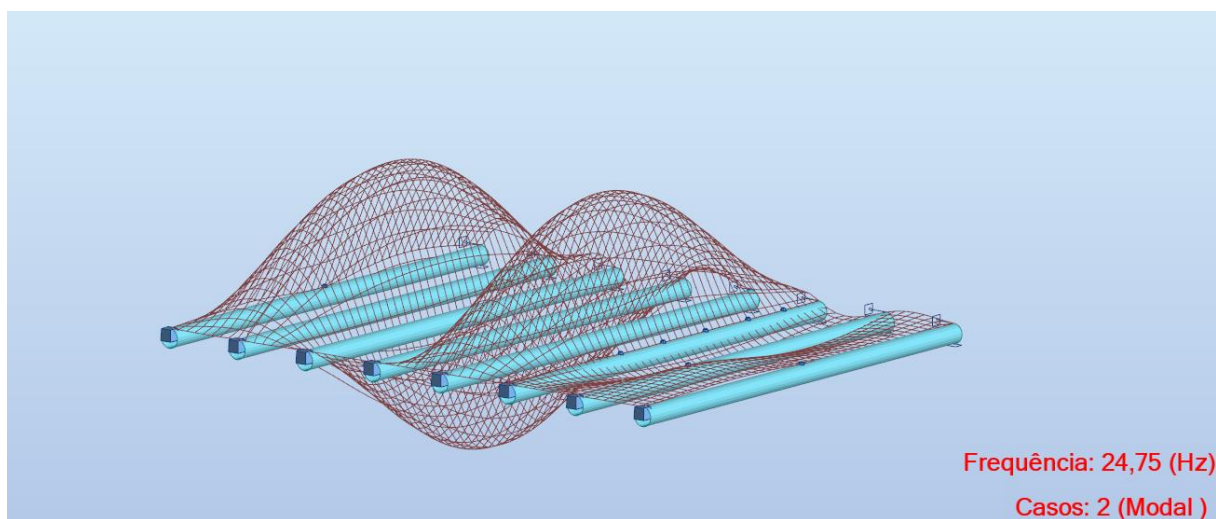
1º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRA_4



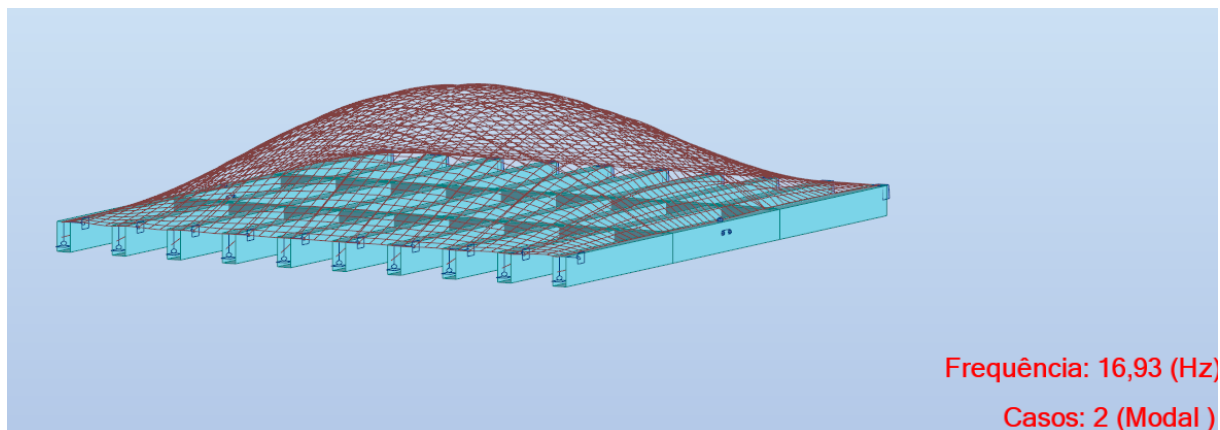
2º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRA_4



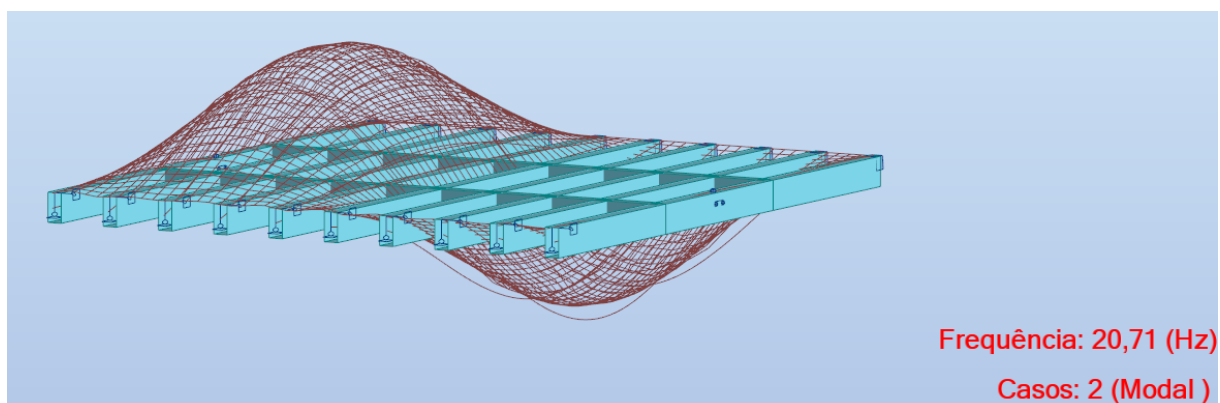
3º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRA_4



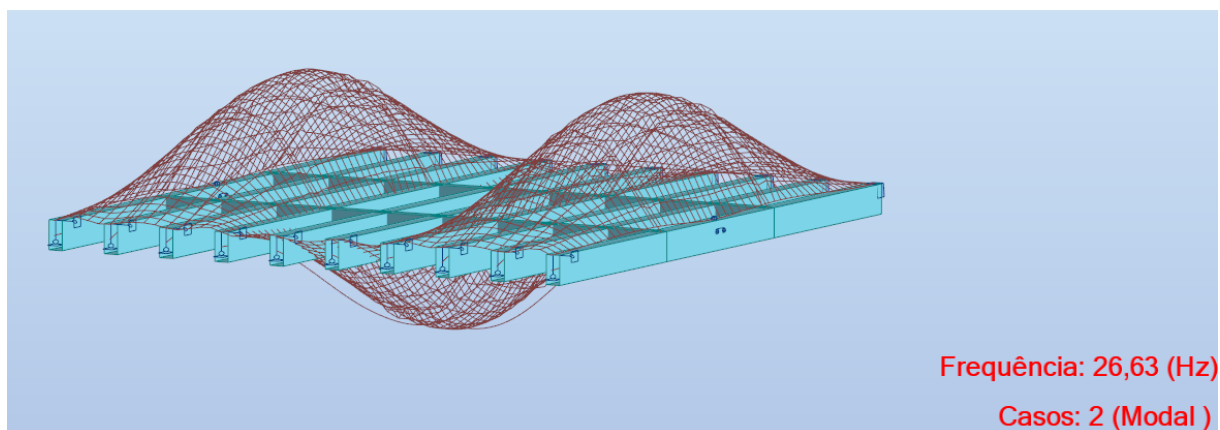
1º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRCP_1



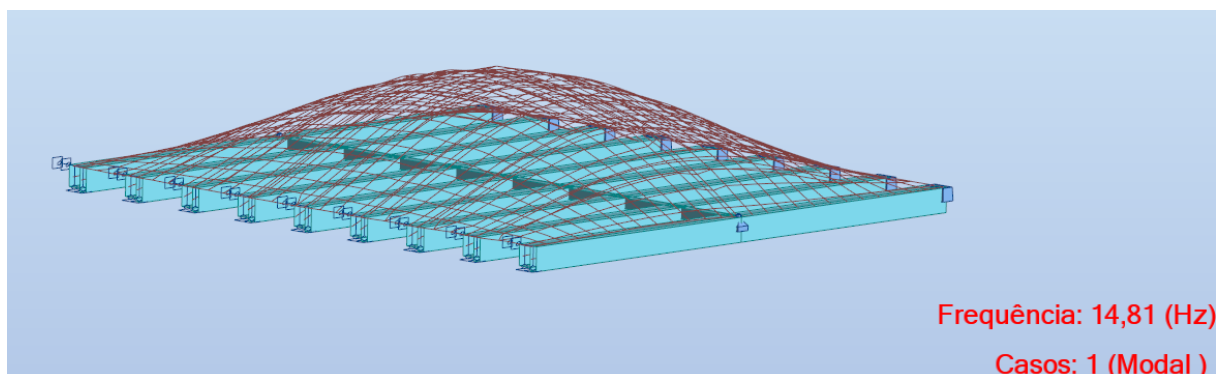
2º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRCP_1



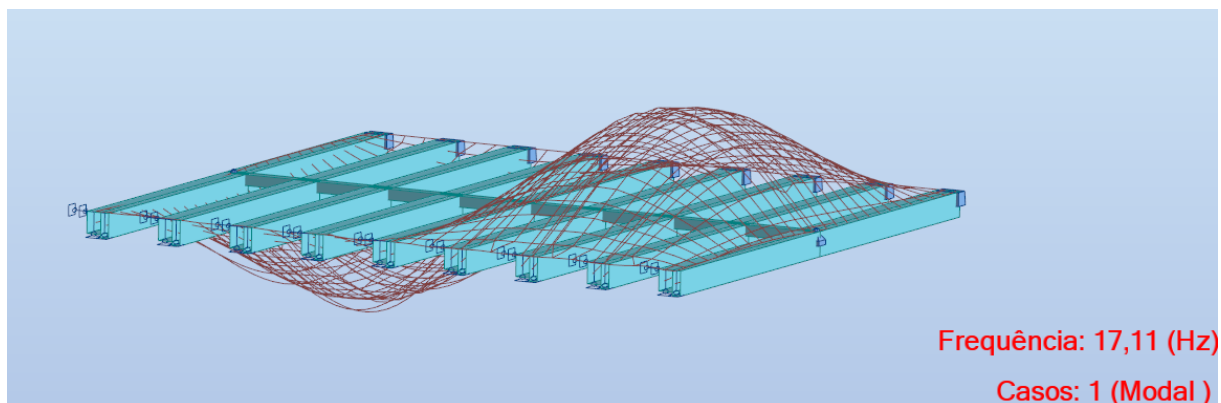
3º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRCP_1



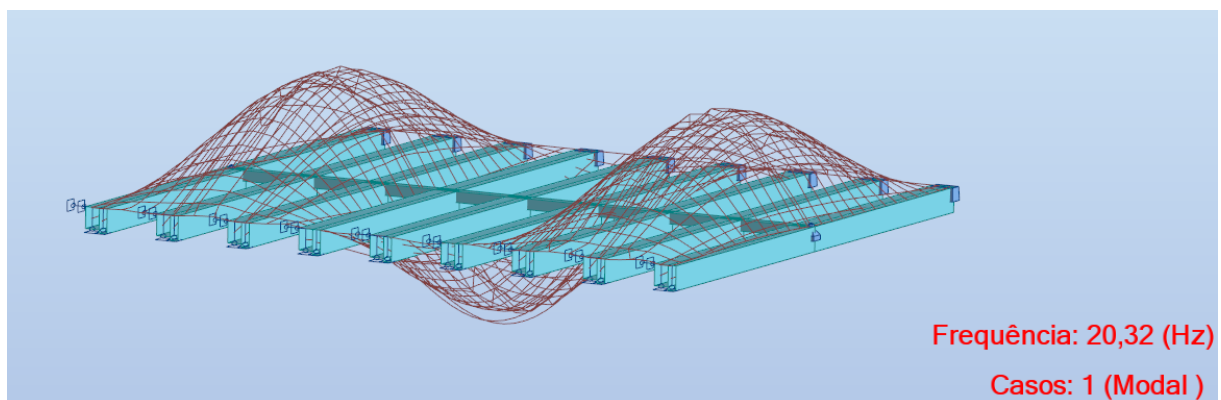
1º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRCP_2



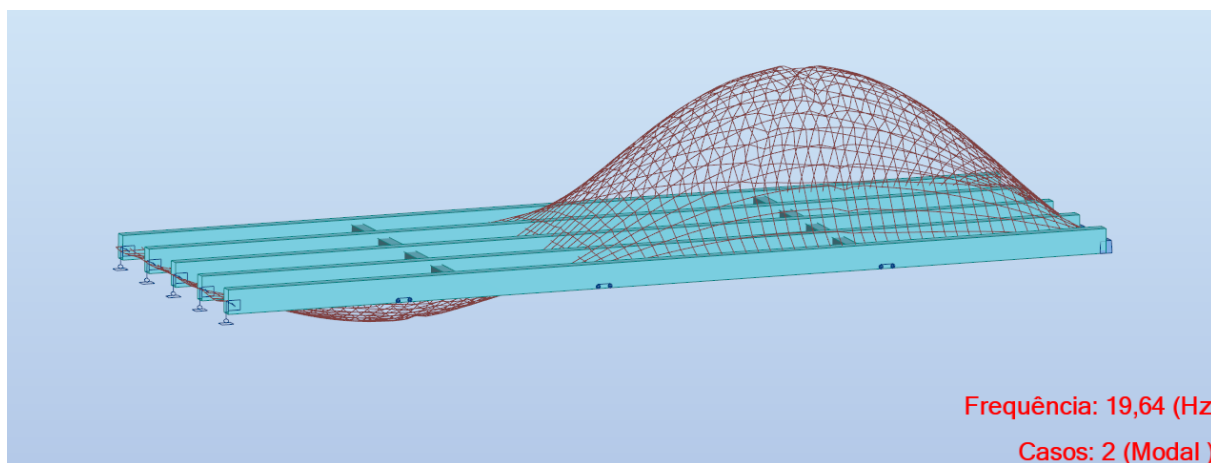
2º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRCP_2



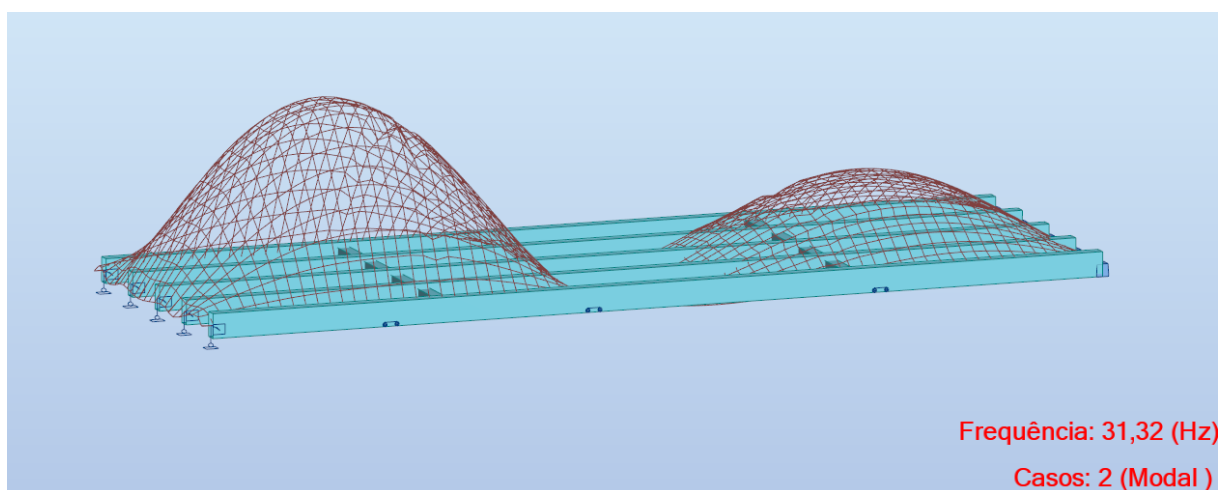
3º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRCP_1



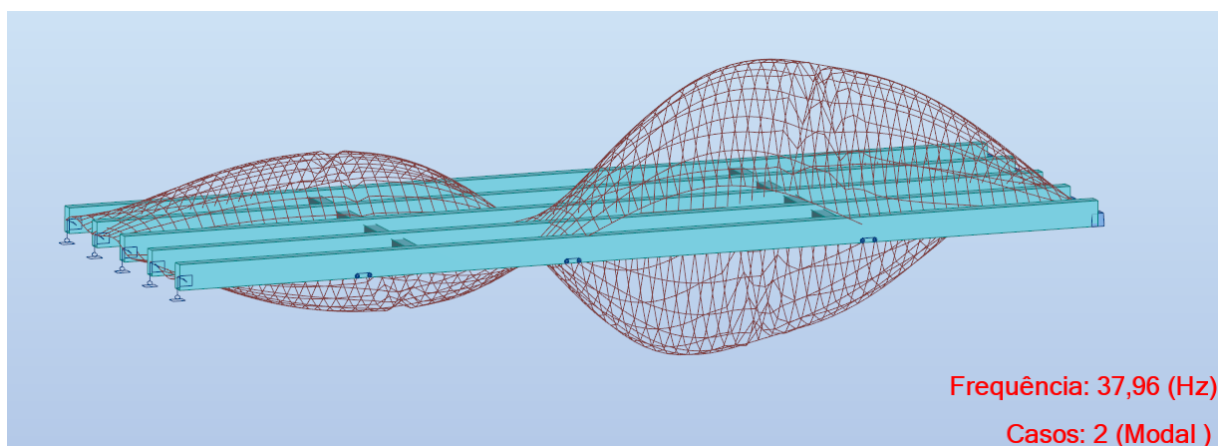
1º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRR_1



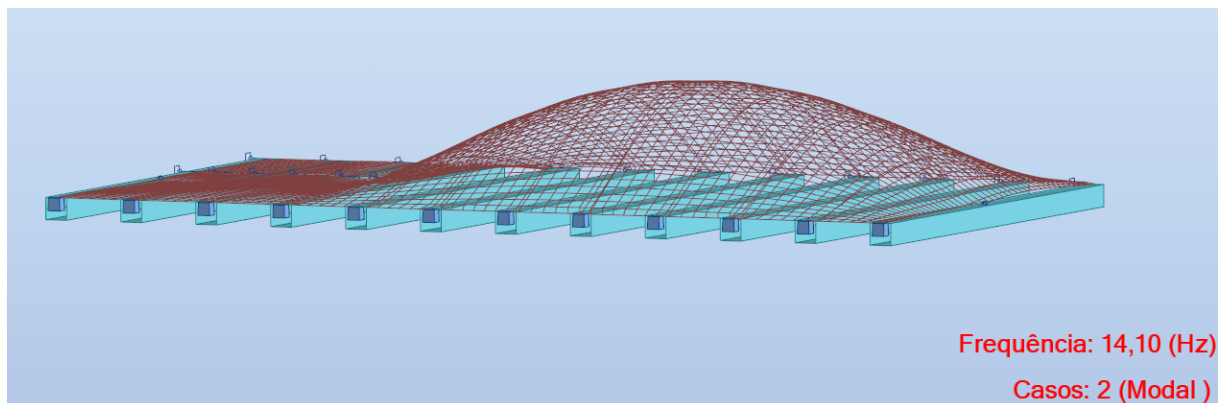
2º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRR_1



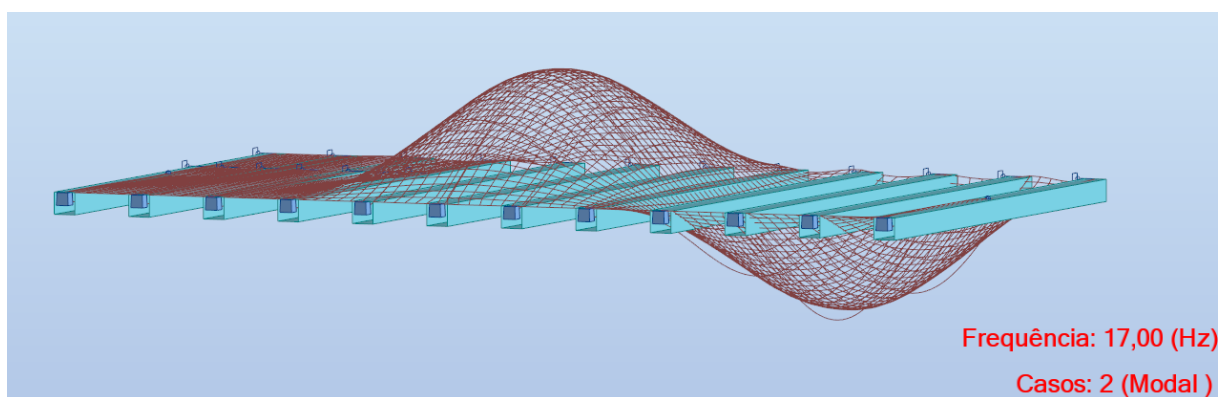
3º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRR_1



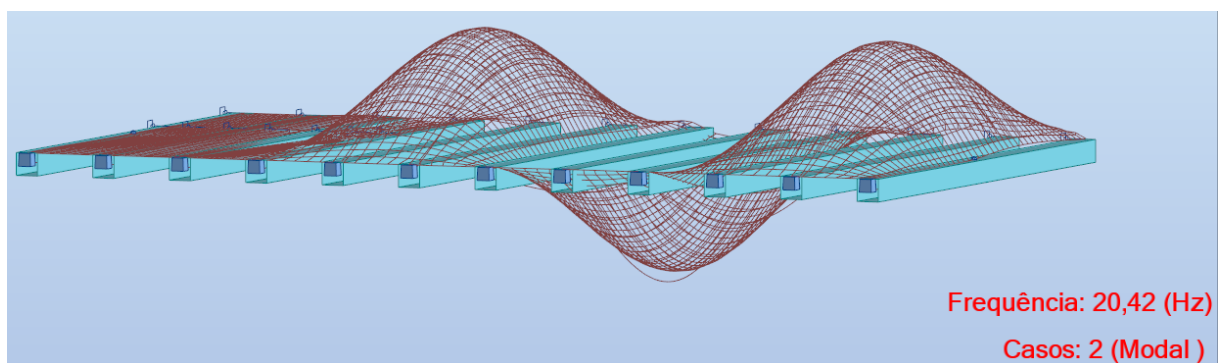
1º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRR_8



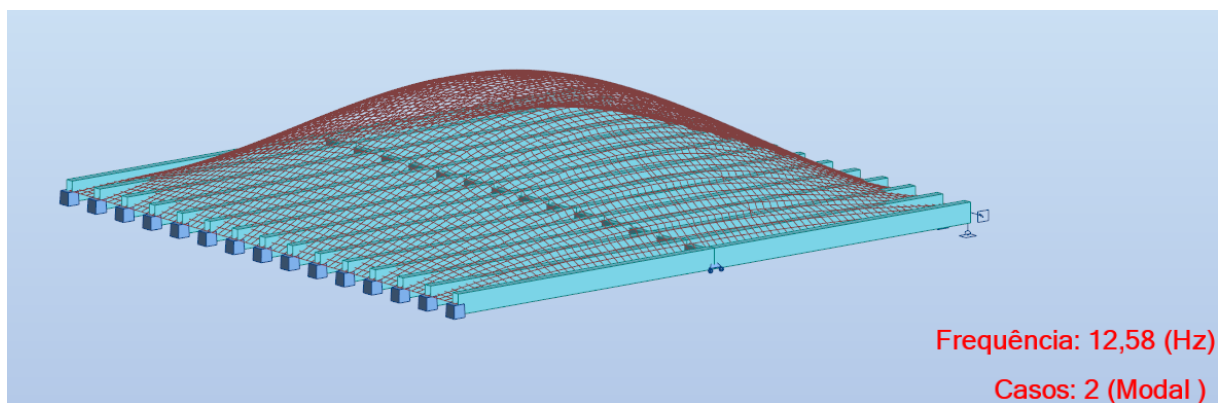
2º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRR_8



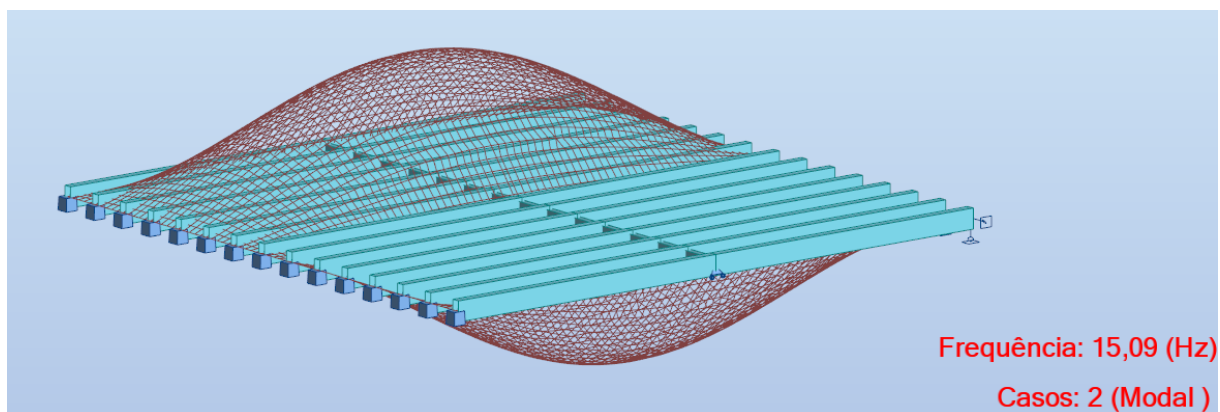
3º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRR_8



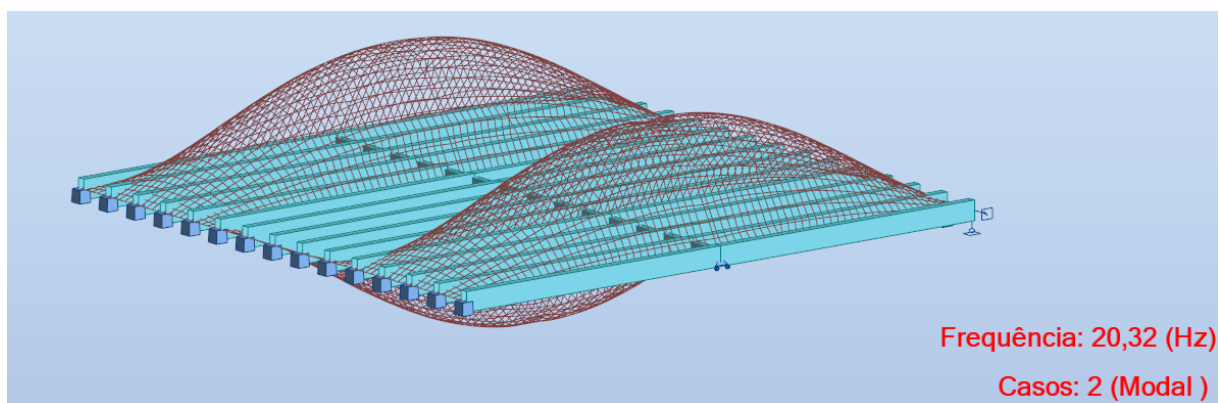
1º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRC_1



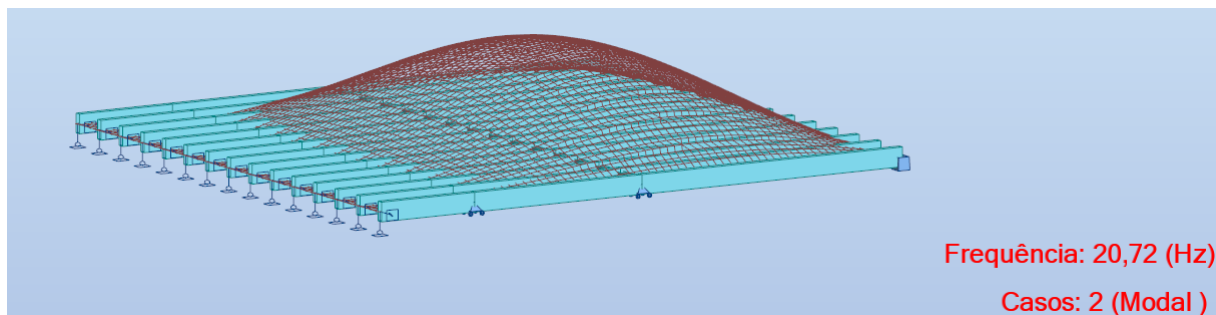
2º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRC_1



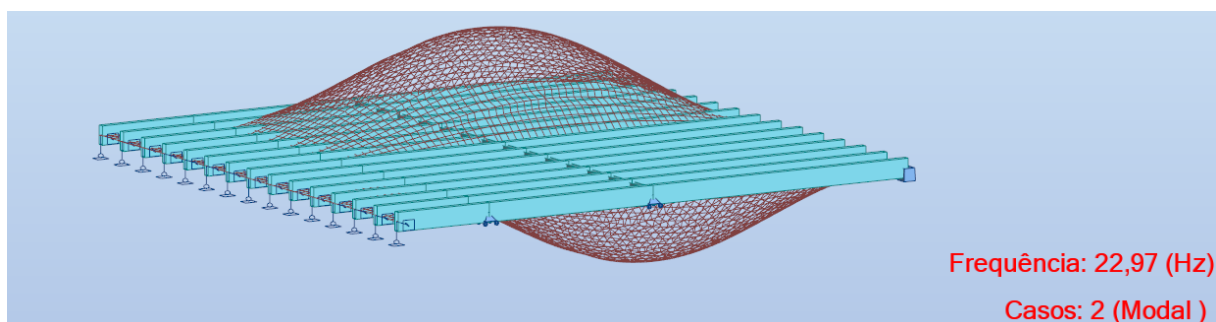
3º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRC_1



1º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRC_3



2º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRC_3



3º MODO DE VIBRAÇÃO / PVRC_3

